



**Helena Maria da  
Costa Paiva**

**Caracterização reológica de argamassas**



**Helena Maria da  
Costa Paiva**

## **Caracterização reológica de argamassas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.

## **o júri**

presidente

Prof. Doutor Vítor Brás Sequeira Amaral  
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Luís Barroso de Aguiar  
Professor Associado da Universidade do Minho

Prof. Doutor João António Labrincha Batista  
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

## **agradecimentos**

Ao Prof. Doutor João Labrincha, pela orientação do trabalho e pela sua permanente disponibilidade.

À empresa Weber-St.Gobain, pela cedência das matérias primas e pela disponibilização do seu Laboratório e dos seus técnicos. Em particular, ao Engº Luis Silva pelo apoio prestado durante a execução do trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, pela colaboração dispensada, nomeadamente, ao Engº Jorge Corker e à Engª Célia Miranda.

Aos colegas de laboratório, pelo incentivo permanente.

À minha família, por todo o apoio.

## resumo

O presente trabalho é realizado com o objectivo geral de estudar o comportamento reológico de argamassas. Pretende-se, por um lado, desenvolver um procedimento adequado para a análise reológica de uma argamassa e, por outro lado, avaliar o efeito de alguns adjuvantes essenciais à sua formulação sobre o comportamento reológico de uma argamassa específica (do tipo monomassa). Procura-se também estabelecer, sempre que possível, uma correlação entre a avaliação reométrica com um método tradicional de medida da trabalhabilidade (espalhamento), de modo a que fosse entendida a utilidade desta avaliação reológica para um processo industrial de desenvolvimento de argamassas ou de ensaio de novos componentes.

No primeiro capítulo do trabalho, efectua-se uma revisão sobre as argamassas e discute-se o comportamento reológico dos materiais cimentícios, incluindo os factores mais relevantes. O segundo capítulo, descreve a metodologia experimental seguida ao longo do trabalho. A argamassa escolhida para o desenvolvimento deste trabalho é uma argamassa de reboco para aplicações exteriores em monocamada, também designada por monomassa. Os adjuvantes escolhidos são um agente retentor de água, um agente introdutor de ar e um agente redutor de água (ou superplastificante). O teor de água de amassadura é também um factor tido em consideração para a análise. Proceda-se, de seguida, à caracterização reológica da argamassa com e sem adjuvantes através da utilização de um reómetro específico para argamassas (Viskomat), sendo também efectuada a avaliação da trabalhabilidade das argamassas pelo método de espalhamento. No caso das argamassas contendo introdutor de ar é medido o teor de ar introduzido na argamassa com um equipamento específico (aerómetro).

O comportamento reológico é avaliado através de dois procedimentos distintos que envolve, no primeiro caso, a execução do ensaio no reómetro com um perfil de velocidade de rotação constante (patamar) e, no segundo caso, com um perfil de velocidade descendente (em escada). O perfil em patamar permite estudar o comportamento reológico ao longo do tempo, tornando possível observar a evolução do fenómeno de destruição estrutural, patente nos cimentos e argamassas, através das curvas de fluxo medidas ao longo do tempo de ensaio. Verifica-se que a histerese presente nas curvas de velocidade ascendente e descendente pode ser relacionada com a existência de tal fenómeno. Conclui-se também que o comportamento desta argamassa pode ser descrito em termos reológicos através do modelo de Bingham. O perfil em escada, a velocidade descendente, permite uma avaliação mais precisa dos parâmetros reológicos determinados de acordo com este modelo, ou seja, a tensão de cedência e a viscosidade plástica.

O efeito sobre a reologia das argamassas dos diversos adjuvantes específicos foi assim avaliado por estes dois procedimentos de medida, bem como, complementado com as medidas de trabalhabilidade pelo método de espalhamento.

Relativamente ao agente retentor de água, foi possível concluir sobre o teor óptimo a utilizar neste tipo de argamassa e sobre o efeito espessante deste adjuvante quando adicionado em quantidades superiores. Observou-se a promoção rápida da destruição estrutural por parte deste agente, visível pela redução acentuada da área de histerese nas curvas de fluxo. Através da variação do teor de água de amassadura nas argamassas com e sem este adjuvante, foi possível constatar um efeito secundário de redução de água de amassadura sem perda de trabalhabilidade.

Em relação ao agente introdutor de ar, estudou-se o seu efeito em argamassas com e sem o agente retentor de água uma vez que são utilizados em conjunto nas monomassas. Foi também possível encontrar o valor recomendável para o teor a usar deste adjuvante. A evolução ao longo do tempo (perfil patamar) permitiu concluir que a introdução deste agente promove uma estabilização rápida não alterando significativamente a destruição estrutural promovida pelo agente retentor, quando usados em conjunto. A avaliação dos parâmetros reológicos (perfil escada) nesta argamassa mostra uma tendência para uma descida da viscosidade e tensão de cedência com o aumento do teor de introdutor de ar. Quando este agente é utilizado isoladamente na monomassa verifica-se um aumento de viscosidade para teores baixos antes de começar a diminuir, como esperado, para teores mais elevados. Relacionou-se este facto com o papel duplo dos agentes introdutores de ar ao poderem funcionar como inertes ou fluidos numa argamassa.

Relativamente ao agente superplastificante, este apresenta tal como no caso anterior um efeito fluidificante, ou seja, de diminuição da tensão de cedência e de viscosidade com o aumento do seu teor na argamassa. Estabiliza rapidamente os valores de torque medidos ao longo do tempo e promove uma rápida destruição estrutural na argamassa. Por outro lado, cumpre claramente o seu papel principal como redutor de água de amassadura e, tal como no caso do introdutor de ar, confirma-se a tendência para um efeito secundário de retardamento da presa.

Em conclusão, foi possível estabelecer um procedimento adequado para a caracterização reológica de argamassas, permitindo observar o efeito que diversos adjuvantes e outros componentes da argamassa (como a água) podem ter sobre o comportamento no estado fresco destes materiais, o que pode ser importante para o desenvolvimento e aplicação de novas formulações.

## **abstract**

The present work aims to study the rheological behaviour of mortars. It pretends to develop an adequate procedure for the rheological analysis and, on the other hand, to evaluate the effect on the rheology of a particular mortar (single-coat render) of some admixtures essential to their formulation. It is also attempted to establish a correlation between the rheometric evaluation and a traditional workability measurement (spread or slump test), in order that the utility of this evaluation could be understood by who deals with the industrial process of mortar's development or testing of new mortar's components. In the first chapter of this work, a literature survey is presented on cement-based mortars and its rheological behaviour, including the most relevant factors. The second chapter describes the experimental methodology followed along the work. The mortar chosen for the development of this work is a single coat render for outdoor applications, also called one-coat render mortar. The admixtures selected were a water retaining agent, an air-entraining agent and a water-reducing agent (or superplasticizer). The kneading water content is also a factor under consideration. The rheological behaviour of the mortar, with and without admixtures, is performed through a specific rheometer for mortars (Viskomat) together with the evaluation of the mortar workability through a consistency test (slump). In the case of mortar with air-entraining agent, the included air was measured with a specific device (airmeter). The rheological behaviour is evaluated through two distinct procedures that involve, in the first case, the test with a speed profile at constant rotation speed (dwell profile) and, in the second one, a test with a profile of descending speed (stair profile). The dwell profile allows studying the rheological behaviour along measuring time, making also possible to observe the structural destruction phenomena, existent in cement and mortar suspensions, through the measurement of flow curves along the test time. The existence of a hysteresis in the up and down flow curves can be related to such structural destruction phenomena. It is concluded that the mortar behaviour can be described by the Bingham model. The stair profile, with descending speed, allows a more precise evaluation of the rheological parameters, determined according to the Bingham model, e.g., the yield stress and the plastic viscosity. The effect on the mortar's rheology of the several admixtures were evaluated by these two test procedures and complemented by the workability measurements with the slump test. Regarding the water retaining agent, it was possible to conclude on the optimal content to use in this kind of mortar and on the thickening effect of this admixture when higher contents are added. A rapid promotion of structural disorder is observed with the introduction of this agent, visible by the accentuated reduction of the hysteresis area of the flow curves.

Trough the variation of kneading water content in mortars with and without this agent, it was also possible to observe a secondary effect of water reduction without a workability loss.

Regarding the air-entraining agent, its effect on the mortars was studied with and without the water retaining agent, since they can be used together in one-coat renders. It was also possible to find this admixture recommended content. The evolution with time (dwell profile) allowed to conclude that this agent also promotes a rapid stabilization, without altering the structural destruction already induced by the water retaining agent, when they are used together. The evaluation of the rheological parameters (stair profile) in this mortar shows a trend of decreasing viscosity and yield stress with the increase on this agent's content. When this agent is used alone a viscosity increase is verified for lower contents before starting to decrease, as expected for higher contents. This fact was related with the double role of this kind of admixture, working as a fluid or as an inert in a mortar.

Regarding the superplasticizer agent, it presents as the previous case a thinning or fluid behaviour, meaning that a decrease on the yield stress and viscosity is observed with the increase in admixture content. Moreover, it clearly performs its role of a water reducing agent and, as with the air-entraining agent, a secondary effect of setting retarding action.

Concluding, it was possible to establish an adequate procedure for the rheological characterization of mortars and observe the effect of several admixtures and other mortar's component (water) on the fresh state behaviour that can be important for the development and application of new formulations.



## Índice

Lista de figuras .....	3
Lista de tabelas.....	7
Nota prévia.....	7
1. Introdução .....	9
1.1. As Argamassas.....	11
1.1.1. Ligantes.....	11
1.1.2. Agregados.....	14
1.1.3. Água de Amassadura .....	15
1.1.4. Adjuvantes .....	16
1.2. Comportamento Reológico.....	23
1.2.1. Reologia das Argamassas.....	23
1.2.2. Métodos de caracterização reológica.....	30
2. Procedimento Experimental .....	37
2.1. Introdução.....	37
2.2. Materiais .....	37
2.2.1. Composição da argamassa base .....	37
2.2.2. Adjuvantes .....	39
2.2.3. Água de amassadura.....	39
2.3. Caracterização reológica.....	40
2.3.1. Reometria.....	41
2.3.2. Método de Espalhamento .....	44
2.3.3. Caracterização complementar.....	45
3. Resultados e Discussão.....	47
3.1. Comportamento reológico de argamassas .....	47
3.2. Efeito de adjuvantes no comportamento reológico .....	56
3.2.1. Efeito do agente retentor de água .....	56
3.2.2. Efeito do agente introdutor de ar .....	62
3.2.3. Efeito do agente redutor de água ou superplastificante.....	71
4. Conclusões.....	79
5. Referências bibliográficas .....	85



## Lista de figuras

Figura 1.1: Proporções típicas entre fases num cimento Portland.	12
Figura 1.2: (a) Aglomeração de partículas de cimento com ar aprisionado numa argamassa sem adjuvante; (b) Na presença de adjuvante (agente plastificante) as partículas de cimento estão dispersas permitindo libertação do ar [1].	18
Figura 1.3: A presença do introdutor de ar promove a formação de bolhas estáveis entre os grãos de cimento e agregados [1].	20
Figura 1.4: Modelo do fluxo de um fluido sob acção de corte [22].	23
Figura 1.5: Curvas de fluxo para fluidos ideais.	24
Figura 1.6: Variação do torque com o tempo a velocidade de corte constante [33].	27
Figura 1.7: Curva de fluxo com histerese de um material cimentício [20]	28
Figura 1.8: Modelo para a destruição estrutural irreversível induzida por acção de corte; (a) Partículas de cimento secas em contacto; (b) Formação de membrana envolvente quando o cimento contacta com água; (c) As pontes das membranas rompem-se sob a acção de corte; (d) Reconstrução das membranas; (e) Em repouso, as membranas aproximam-se para uma distância correspondente ao mínimo de energia repulsiva [23].	30
Figura 1.9: Efeito da água de amassadura sobre a viscosidade (ou coeficiente h) e a tensão de cedência (ou coeficiente g) [24].	34
Figura 1.10: Efeito de adjuvantes (plastificante e introdutor de ar) nos parâmetros reológicos de uma argamassa [24].	35
Figura 2.1: Curva granulométrica cumulativa do agregado utilizado na composição da argamassa.	38
Figura 2.2: Reómetro utilizado para argamassas (Viskomat).	41
Figura 2.3: Perfil de velocidade em patamar.	42
Figura 2.4: Perfil de velocidade em escada.	43
Figura 2.5: Mesa de espalhamento para argamassas	44
Figura 2.6: Aerómetro para determinação de ar introduzido em argamassas.	45
Figura 3.1: Variação do torque em função do tempo de ensaio para a argamassa base com 21% de água de amassadura (perfil patamar a 160 rpm).	47
Figura 3.2: Reprodutibilidade da variação do torque em função do tempo da argamassa base em ensaios com perfil em patamar.	48

Figura 3.3: Variação do torque com o tempo para (a) 80, (b) 120 e (c) 160 rpm	50
Figura 3.4: Efeito da velocidade de corte sobre a destruição inicial de estrutura: (a) 80, (b) 120 e (c) 160 rpm.	51
Figura 3.5: Curvas de fluxo obtidas com a argamassa base a 80 (a), 120 (b) e 160 rpm (c) após diferentes tempos de ensaio (0, 15 e 30 minutos). As setas indicam a velocidade ascendente e descendente.	52
Figura 3.6: Curvas de fluxo da argamassa base obtidas ao fim de 15 minutos de ensaio num perfil em patamar a 160 rpm; (a) curvas com velocidade ascendente e descendente; (b) Determinação dos parâmetros reológicos de acordo com o modelo de Bingham.	54
Figura 3.7: Curva de fluxo da argamassa base obtida num perfil em escada (velocidade decrescente)	55
Figura 3.8: Variação de torque com o tempo de ensaio de argamassas com e sem agente retentor de água (21% água de amassadura).	57
Figura 3.9: Efeito do agente retentor de água (0.08%MHPC) sobre a histerese da curva de fluxo obtida com um perfil tipo patamar aos 0, 15 e 30 minutos de ensaio, comparativamente à argamassa sem adjuvante (AB).	57
Figura 3.10: Variação de g e h em função do tempo de ensaio para uma argamassa com 0.08% de MHPC e 21% de água de amassadura (perfil tipo patamar).	58
Figura 3.11: Efeito do teor de agente retentor de água nos parâmetros reológicos (g e h) determinados a partir de ensaios efectuados com um perfil tipo escada (argamassas com 19% de água de amassadura).	59
Figura 3.12: Efeito do teor de água de amassadura sobre a reologia das argamassas com agente retentor de água (perfil tipo escada).	61
Figura 3.13: Variação do torque com o tempo para a argamassa base preparada com 21% de água de amassadura e para a argamassa com 0.08% MHPC com 19% de água.	62
Figura 3.14: Variação de torque com o tempo de ensaio de argamassas com e sem agente introdutor de ar (preparadas com 21% de água de amassadura).	63
Figura 3.15: Efeito do agente introdutor de ar (0.025%) sobre a histerese da curva de fluxo obtida com um perfil em patamar ao fim de 0, 15 e 30 minutos de ensaio (argamassa preparada com 21% H <sub>2</sub> O).	65

Figura 3.16: Variação de g e h em função do tempo de ensaio de uma argamassa com 0.025% de agente introdutor de ar e 0.08%MHPC preparada 21% de água (perfil tipo patamar).	65
Figura 3.17: Efeito do teor de agente introdutor de ar nos parâmetros reológicos (g e h) determinados a partir de ensaios efectuados com 19% de água de amassadura (perfil tipo escada): (a) argamassa base com 0.08%MHPC e IA; (b) argamassa base só com IA .	66
Figura 3.18: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de introdutor de ar para argamassas com e sem agente retentor de água (0.08% de MHPC). Ambas contêm 19% de água de amassadura.	68
Figura 3.19: Efeito do teor de água de amassadura sobre a reologia das argamassas com agente introdutor de ar (perfil tipo escada).	69
Figura 3.20: Variação do torque com o tempo de uma argamassa base preparada com 21% de água de amassadura e de outra argamassa contendo 0.025% IA e 19% de água.	71
Figura 3.21: Variação de torque com o tempo de ensaio de argamassas com diferentes teores de agente redutor de água (SP) preparadas com 21% de água e 0.08% MHPC.	72
Figura 3.22: Efeito do agente redutor de água (0.10%) sobre a histerese da curva de fluxo (perfil tipo patamar aos 0, 15 e 30 minutos de ensaio) de argamassas preparadas com 21% de água de amassadura e contendo 0.08% MHPC.	73
Figura 3.23: Variação de g e h em função do tempo de ensaio de uma argamassa contendo 0.10% de agente redutor de água e 0.08% MHPC e preparada com 21% de água de amassadura (perfil em patamar).	74
Figura 3.24: Efeito do teor de agente redutor de água (SP) nos parâmetros reológicos (perfil em escada) de uma argamassa preparada sem MHPC e com 19% de água de amassadura.	74
Figura 3.25: Efeito do teor de água de amassadura sobre a reologia de argamassas com 0.10% de agente redutor de água e 08% de MHPC (perfil tipo patamar; após 15 minutos de ensaio).	76
Figura 3.26: Variação do torque com o tempo de uma argamassa base contendo 21% de água de amassadura e de uma argamassa com 0.10% de Spe 0.08% MHPC e com 19% de água.	77

Figura 4.1:Resumo esquemático do efeito do agente retentor de água (MHPC), do 83  
introdutor de ar (IA), do superplastificante (SP) e da água de  
amassadura (AA) sobre o comportamento reológico da argamassa  
estudada. As setas indicam o aumento dos teores dos referidos  
componentes da argamassa

## **Lista de tabelas**

Tabela 2.1: Composição da argamassa base (AB).	38
Tabela 2.2: Composições de argamassas ensaiadas	41
Tabela 3.1: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de agente retentor de água (MHPC)	60
Tabela 3.2: Variação do teor de ar introduzido medido no aerómetro.	63
Tabela 3.3: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de introdutor de ar.	67
Tabela 3.4: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de introdutor de ar.	70
Tabela 3.5: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de agente redutor de água ou superplastificante (SP).	75

## **Nota prévia**

Durante todo o documento será utilizado para marcar a casa decimal dos números o ponto (".") em vez da vírgula (","), embora esta última seja a notação usada em termos nacionais.





## 1. Introdução

Os materiais cimentícios no estado fresco são suspensões concentradas, de partículas reactivas de cimento e partículas inertes de agregado dispersas em água. As pastas de cimento apresentam partículas com tamanho até 0.2 mm enquanto que nas argamassas os agregados possuem partículas cujo tamanho máximo pode atingir 5 mm e finalmente, nos betões podem encontrar-se agregados com tamanho de partícula superior a 20 mm [1,2,3].

Em qualquer destes materiais, o tempo de trabalho é determinado pela reacção química entre o cimento e a água. Nesta reacção forma-se inicialmente uma camada de produtos hidratados que se mantém durante um período de repouso, de reacção lenta, após o qual se inicia o endurecimento do material. Se não existisse esse período de trabalho, durante o qual é possível manusear, aplicar e compactar o material, muitas das utilizações normais dos materiais cimentícios não seriam possíveis [1,2,3].

Então, genericamente, as argamassas são constituídas pela mistura, em proporções adequadas, de três componentes básicos: ligantes, agregados e água. Para além destes componentes, é usual a adição de adjuvantes em muito pequenas quantidades para modificar algumas características [1,2,3,4].

O desenvolvimento de composições para argamassas, relativamente ao teor de cada um dos seus componentes, efectua-se em função da sua aplicação final, nomeadamente, se são argamassas para reboco, de assentamento de pavimentos e revestimentos, de juntas e de reparação [1].

O sistema a estudar é uma argamassa tipo monomassa, que é uma argamassa de revestimento, aplicada numa só camada, garantindo a protecção da fachada do edifício e assegurando a sua decoração. Este tipo de material é designado também como reboco monocamada [5].

Uma vez que a aplicação de argamassas é muito dependente das suas características no estado fresco que, por sua vez, condicionam as propriedades

do material endurecido, pretende-se neste trabalho estudar o comportamento reológico de uma argamassa monomassa típica, analisando-se também os efeitos de alguns adjuvantes principais, através da utilização de um reómetro específico para argamassas e pastas de cimento. Procura-se também estabelecer uma correlação entre os resultados de reometria e os obtidos por um método tradicional de avaliação da trabalhabilidade.

Neste contexto, o primeiro capítulo começa por efectuar uma revisão sobre as argamassas e sua constituição, para de seguida apresentar os factores mais relevantes do comportamento reológico dos materiais cimentícios, bem como dos métodos desenvolvidos para a sua análise.

## **1.1. As Argamassas**

Tradicionalmente as argamassas eram produzidas no local da obra doseando a água com ligantes, agregados e adjuvantes adquiridos separadamente. Embora muitas argamassas em aplicação sejam assim produzidas em estaleiro, o aparecimento de empresas de argamassas secas tem vindo a conquistar uma quota significativa do mercado, oferecendo produtos de qualidade controlada e aos quais é apenas necessário juntar a quantidade de água estipulada para obter o produto final pronto a aplicar. O fornecimento destes produtos é efectuado em saco, silo ou em casos específicos na forma de pasta ou suspensão.

O desenvolvimento de argamassas, por exemplo, com ligantes poliméricos ou adjuvantes sintéticos especiais permitiu melhorar a qualidade do produto e ir ao encontro de requisitos especiais da construção moderna. Neste âmbito, o investimento em termos da investigação necessária para o desenvolvimento ou optimização das argamassas tem vindo a aumentar consideravelmente no que diz respeito ao estudo das propriedades destes produtos no estado fresco ou endurecido.

### **1.1.1. Ligantes.**

A designação de ligante advém da capacidade que estes materiais possuem de poder aglomerar uma grande quantidade de materiais inertes, conferindo ao conjunto uma grande coesão e resistência [1,4]. Existem diversos tipos de ligantes que são utilizados em argamassas, tais como, o cimento, a cal aérea ou hidráulica, o gesso e ainda algumas resinas orgânicas para aplicações específicas [1,4].

O cimento é actualmente o ligante hidráulico mais utilizado na formulação de argamassas, nomeadamente o designado como cimento Portland. Trata-se de um material constituído por pós muito finos que ao serem misturados com a água formam uma pasta cujo endurecimento acontece apenas pela reacção química entre o cimento e a água [1,6].

De facto, os sais minerais que compõem o cimento reagem com a água dando origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis que cristalizam em hábito acicular, emaranhando-se e colando-se uns nos outros conferindo ao conjunto uma resistência notável [7].

Os constituintes principais das matérias-primas do cimento portland são a cal ( $\text{CaO}$ ), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). As matérias-primas, doseadas de acordo com a composição desejada, são misturadas e sujeitas a temperaturas, em fornos rotativos, da ordem de 1400 a 1650°C, onde por reacção química a mistura se converte em clínquer de cimento, o qual é arrefecido de seguida e reduzido a pó. É normal adicionar-se ao clínquer pulverizado uma pequena quantidade de gesso (4-5%) com a função de controlar a presa, obtendo-se assim o cimento [1,4,6].

O cimento portland apresenta quatro constituintes principais, o silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ), normalmente representado por  $\text{C}_3\text{S}$ , o silicato dicálcico ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ), representado por  $\text{C}_2\text{S}$ , o aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ), designado por  $\text{C}_3\text{A}$  e a aluminoferrite tetracálcica ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que é representada como  $\text{C}_4\text{AF}$ . A figura 1.1 apresenta uma relação típica entre as fases presentes num cimento. No entanto, o teor de cada constituinte no cimento Portland pode variar dentro de uma gama bastante alargada dependendo das materias primas utilizadas. O silicato tricálcico varia entre 20 e 65%, o silicato bicálcico entre 10 e 55%, o aluminato tricálcico entre 0 e 15% e o aluminoferrato tetracálcico pode ocorrer entre 5 e 15% do peso total de cimento. As fases  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  constituem cerca de 75% do peso deste cimento [1,7].

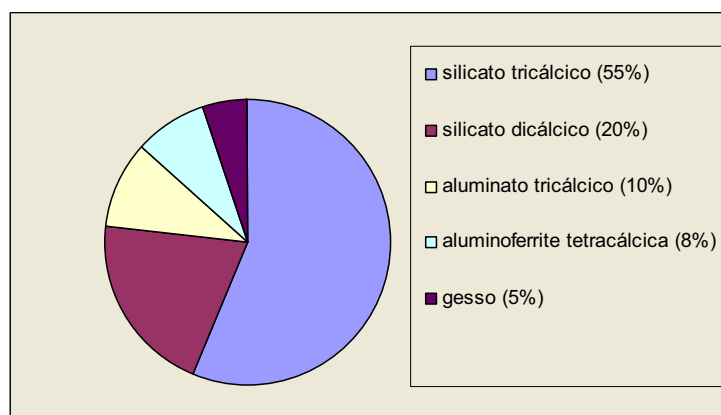


Figura 1.1: Proporções típicas entre fases num cimento Portland [2].

Embora os estudos de hidratação se refiram aos componentes puros do cimento, na realidade esses componentes não existem nessa forma mas sim como soluções sólidas contendo alumina, magnésio, sódio e outros elementos dopantes da rede cristalina [1,4,6].

Como o cimento é um sistema multicomponente, a sua hidratação é um processo complexo, que ainda não se encontra totalmente estudado e que consiste numa série de reacções químicas individuais que acontecem em paralelo e sucessivamente [1,4]. O progresso da hidratação e a sua cinética são influenciados por factores como:

- Composição do cimento e presença de iões estranhos à rede cristalina;
- Distribuição granulométrica das partículas de cimento, especificamente a área superficial;
- Relação água / cimento;
- Temperatura;
- Presença de adições,
- Presença de adjuvantes.

A hidratação de uma pasta de cimento Portland, à temperatura ambiente, é caracterizada por diferentes estágios [1,4,6]:

#### *Período de pré-indução*

Imediatamente após o contacto do cimento com a água, ocorre uma rápida dissolução de espécies iónicas, presentes no cimento, para a fase líquida. A duração deste período não ultrapassa alguns minutos e este período de hidratação rápida parece ser desacelerado pela formação de uma camada de produtos de hidratação à superfície dos grãos de cimento. Desta forma é criada uma barreira entre o material não hidratado e a fase líquida. A película que se forma é instável e semipermeável.

#### *Período de indução ou dormente*

Após o período anterior de rápida hidratação, a velocidade de reacção decresce para valores muito baixos durante um período de algumas horas. Durante este estágio os minerais do cimento hidratam de uma forma extremamente lenta.

Este é o período durante o qual o material permanece trabalhável e no qual se torna fundamental conhecer as suas propriedades reológicas.

#### *Período de aceleração*

A partir deste momento a reacção de hidratação acelera novamente sendo controlada pela cinética de nucleação e crescimento dos produtos da reacção. Este período pode ocorrer de 3 a 12 horas após a mistura e coincide com o início da presa.

A presa consiste na perda progressiva da consistência pastosa da pasta de cimento. O instante em que a pasta inicia essa perda corresponde ao início da presa e, quando deixa de ser deformável, transformando-se numa massa rígida, é o final da presa e o começo do endurecimento correspondente ao período seguinte.

#### *Período de pós-aceleração*

Neste período a taxa de hidratação decresce gradualmente à medida que a quantidade de material não hidratado diminui e a reacção passa a ser controlada pela velocidade de difusão. Embora a velocidade de difusão seja muito baixa, verifica-se uma reacção mensurável que persiste mesmo após meses de cura. A este processo corresponde o fim da presa e início do endurecimento ou cura do material.

### **1.1.2. Agregados**

Constituindo os agregados ou inertes cerca de 70 a 80% do volume do material, é fácil compreender que a sua qualidade assuma um papel muito importante nas propriedades dos materiais cimentícios [1,4].

Em termos de classificação granulométrica, o inerte que fica retido no peneiro com malha de 5 mm de abertura é designado por grosso, sendo godo se for de origem sedimentar, rolado (calhau ou seixo) ou brita se for partido artificialmente (britado). O inerte com dimensões inferiores a 5 mm é designado por areia, rolada quando natural, de origem sedimentar, ou britada quando obtida artificialmente.

Relativamente às argamassas, a areia é o maior constituinte dos agregados, de modo que qualquer variação na sua qualidade implica um considerável efeito na argamassa resultante. Os principais factores que afectam a qualidade da areia são o tamanho médio de partícula e a sua distribuição granulométrica, a forma das partículas e a presença de impurezas, nomeadamente o teor em argila [1,4]. Também são utilizadas cargas leves para substituir parcial ou totalmente a areia, com predominância da perlite, vermiculite, poliestireno expandido e fumo de sílica [8].

Originalmente, a utilização de agregados dispersos na massa de cimento acontece por razões económicas, já que estes têm menor custo que o cimento. No entanto, a sua adição acrescentou outras vantagens, nomeadamente técnicas, pois em geral o agregado é mais resistente que a matriz de cimento e confere ao conjunto maior estabilidade e durabilidade [1,3]. Numa monomassa, a areia tem como principal função reduzir a retracção e melhorar a resistência mecânica [9].

### **1.1.3. Água de Amassadura**

A água de amassadura é indispensável para que as reacções de hidratação ocorram e para promover a ligação entre as partículas de cimento e as partículas dos agregados. Existem duas componentes fundamentais na água de amassadura, ou seja, a água de hidratação para o cimento e a água de molhagem dos agregados que permite uma boa ligação entre as partículas do sistema. A água em excesso, água livre, que é colocada no sistema, é responsável pela retracção e porosidade final das argamassas endurecidas [10].

A qualidade da água de amassadura utilizada é importante para as características finais das argamassas. Todas as águas que não apresentem cheiro ou sabor podem ser utilizadas na amassadura dos materiais cimentícios. Quando a água não é potável, apresentando sabor ou cheiro anormais ou materiais em suspensão, pode afectar as características do material através das substâncias dissolvidas e em suspensão [1].

O factor mais influente na trabalhabilidade do material cimentício em fresco é o teor em água de amassadura, entendendo-se por trabalhabilidade a facilidade de

manuseamento e aplicação de uma argamassa, que caracterizam a sua adequação a uma determinada utilização (EN 1015-19), pois as mais pequenas variações no teor de água implicam mudanças significativas no comportamento reológico das misturas frescas, o que está directamente relacionado com a concentração de sólidos da suspensão, ou seja, com a sua densidade [11,12].

#### **1.1.4. Adjuvantes**

Designa-se por adjuvante a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa de cimento, adicionada durante a amassadura aos componentes normais das argamassas e betões, com a finalidade de modificar certas propriedades destes materiais, quer no estado fluido, quer no estado sólido ou na passagem de um estado para o outro. A utilização do adjuvante não deve ser confundida com a de adições, que é toda a substância que se adiciona ao cimento, à argamassa ou ao betão, em quantidades superiores a 5% da massa do cimento, ou no caso de serem adicionados em quantidades inferiores, que não alteram as características em qualquer dos estados referidos [1].

Os adjuvantes podem ser classificados de acordo com a sua acção principal:

- Reologia das argamassas e betões frescos,
- Teor de ar de argamassas e betões
- Presa e endurecimento
- Expansão;
- Resistência a acções físicas;
- Resistência a acções químicas;
- Resistência a acções biológicas;
- Cor

Os adjuvantes são classificados pela sua acção principal, mas na prática podem apresentar múltiplos efeitos secundários. Por exemplo, os plastificantes redutores de água de amassadura podem ser também retardadores de presa e os agentes introdutores de ar, que aumentam a resistência ao gelo-degelo pela formação de bolhas de ar, têm como efeito simultâneo o aumento da trabalhabilidade do



material e a diminuição da capilaridade [1,4,13]. A utilização de adjuvantes tem sempre um efeito sobre a trabalhabilidade dos materiais cimentícios em fresco. Esta influência deve-se à sua acção sobre a velocidade de hidratação inicial e à sua acção de regulação das propriedades reológicas do material cimentício fresco.

Apresentam-se de seguida três tipos de adjuvantes com forte influência na reologia e que são bastante utilizados em diversas argamassas, nomeadamente, os agentes redutores de água, os agentes introdutores de ar e os agentes retentores de água.

### ***Plastificantes ou agentes redutores de água de amassadura***

Os agentes redutores de água ou plastificantes permitem a redução da quantidade de água de amassadura e fluidificam o material, ou seja, possibilitam diminuir a água de amassadura mantendo a trabalhabilidade desejada ou então aumentar esta sem subir a dosagem de água [1,2,4,13]. Este tipo de adjuvante é constituído por uma categoria de substâncias designadas como tensioactivas. Estas substâncias possuem propriedades físico-químicas que modificam a tensão superficial do solvente, neste caso, a água.

Os agentes plastificantes mais utilizados apresentam como substâncias activas base os linhossulfonatos, os polihidroxicarboxílicos e as resinas abiéticas alcalinas. Estas substâncias possuem moléculas longas com uma extremidade hidrófila, formada por grupos hidrocarboxílicos, por sais destes ácidos, como os carboxilatos de sódio, cálcio ou outros, por grupos do ácido sulfónico ou por sais destes ácidos tais como os sulfonatos de sódio [1].

A outra extremidade, hidrófoba, pode ser constituída por uma cadeia alcalina simples, mais ou menos ramificada, podendo conter núcleos benzénicos, linhossulfónicos, naftalénicos ou outros. A extremidade hidrófila, quando em contacto com a água ioniza-se e a sua função é a de baixar a tensão superficial da superfície onde a molécula de tensio-activo está adsorvida [1,2,4,13].

Na mistura de uma argamassa apenas com água, as partículas do material vão flocular e aglomerar pelas tensões capilares devidas à presença da água e do ar,

arrastado pelos componentes da argamassa (figura 1.2a). Na presença de um plastificante, quando as partículas do material entram em contacto com a água, estas são mais eficientemente molhadas pelo líquido devido à adsorção da parte hidrófoba da molécula de dispersante, de forma que a parte hidrófila, ionizada, confere às partículas uma carga eléctrica do mesmo sinal, criando um potencial e uma repulsão electrostática. Este potencial orienta por sua vez os dipolos que constituem as moléculas de água, em volta das partículas, formando uma camada de moléculas de líquido que impede a aproximação entre as partículas e favorece a expulsão do ar presente, como se pode observar na figura 1.2b.

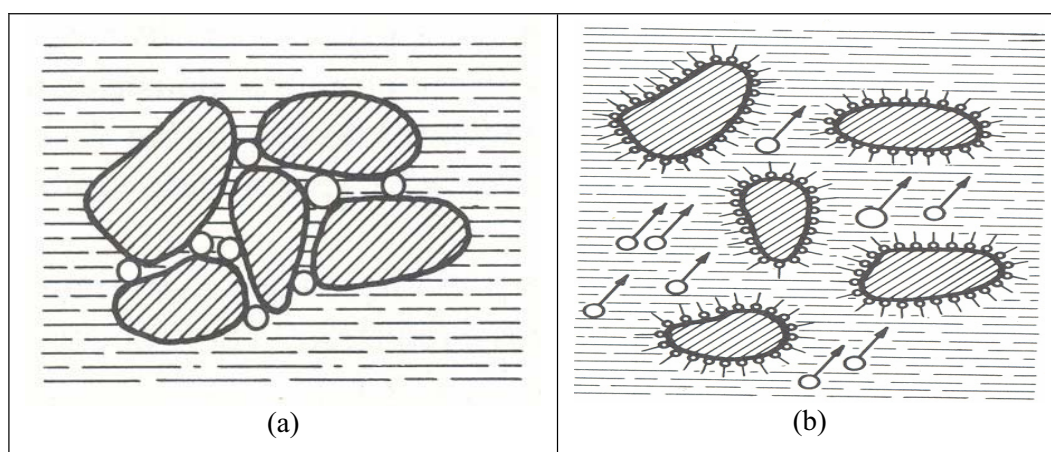


Figura 1.2: (a) Aglomeração de partículas de cimento com ar aprisionado numa argamassa sem adjuvante; (b) Na presença de adjuvante (agente plastificante) as partículas de cimento estão dispersas permitindo libertação do ar [1].

Desta forma, a dispersão e estabilidade dos grãos de material é obtida pela conjugação de três factores, a redução da tensão intersuperficial, aumento do potencial eletrocinético e formação de uma camada protectora e aderente de moléculas de água. Como consequência, a água que separava os grãos de material, quando não existia o dispersante, fica livre entre as partículas dispersas. Por outro lado, a camada de água em redor das partículas diminui o atrito entre elas, melhorando o fluxo do material ou possibilitando a redução da própria água sem alterar a trabalhabilidade do material, daí estes adjuvantes serem denominados de redutores de água de amassadura [1,4].

A eficiência dos plastificantes, redutores de água de amassadura, é determinada pela composição química do cimento, em particular pelo teor em aluminato

tricálcico, considerando-se tanto menos eficaz quanto menor o teor de aluminato tricálcico no cimento usado na argamassa. O aumento das dosagens de plastificante pode impedir as reacções de hidratação do cimento e comprometer o endurecimento do material [1,2,4,13].

Existe uma nova classe de adjuvantes, denominados superplastificantes, que permitem fluidificar os materiais cimentícios ou aumentar a sua resistência ultrapassando essas dificuldades, pois podem ser usados em dosagens maiores sem inibir as reacções de hidratação. Com estes materiais não há distinção na adsorção pelos componentes principais do clínquer e a sua capacidade de dispersão é superior, permitindo reduzir muito a relação água/cimento para trabalhabilidades iguais, sem influência no processo de hidratação. O problema destes materiais, para além do seu custo, pois são sintéticos, é o facto de que embora o seu efeito como fluidificante seja muito intenso ele desaparece ao fim de cerca de 30 minutos, sendo necessário proceder a novas adições [1,13].

### ***Agentes introdutores de ar***

A utilização de introdutores de ar resulta da necessidade de aumentar a resistência ao gelo-degelo, ou seja, a durabilidade dos materiais expostos a alternâncias de temperatura acima e abaixo dos 0°C, pois a acção de ciclos repetidos de congelação e descongelação dentro dos poros representa um acréscimo de fadiga, que pode conduzir à destruição do material [14,15].

As substâncias químicas que promovem a introdução de ar são semelhantes a muitas das que plastificam o cimento por adsorção. A diferença essencial reside no comprimento da parte hidrófila da molécula que tem, neste caso, de ser bastante mais comprida. Devido a este facto, podem encontrar-se no mercado produtos que são simultaneamente plastificantes e introdutores de ar [1,4].

A molécula de um introdutor de ar é composta por um grupo hidrófilo, polar, possuindo um certo momento eléctrico e dotado de elevada afinidade química, que ioniza em contacto com a água, e de um grupo hidrófobo, não polar, formado por uma cadeia comprida de carbonos ou outros radicais orgânicos, insolúveis na água e de fraca afinidade química. Existem imensos produtos químicos que

constituem os agentes introdutores de ar, tais como, linhossulfonatos, trietanolamina, resinato de sódio, entre outros [1,4,13].

Em meio aquoso contendo ar que é arrastado pelos componentes da argamassa, as moléculas orgânicas orientam-se na interface ar-água de forma a que o grupo hidrófilo fique em contacto com a água e a extremidade hidrófoba fora dela, favorecendo a formação de bolhas de ar estáveis entre os grãos de areia e de cimento, tal como se pode observar na figura 1.3. A extremidade hidrófila ioniza-se na água e, tudo se passa como se as bolhas estivessem carregadas com o mesmo sinal eléctrico, repelindo-se entre si e dispersando-se na pasta. Devido à tensão resultante da energia superficial da película que limita a bolha, esta torna-se esférica [1,4,13].

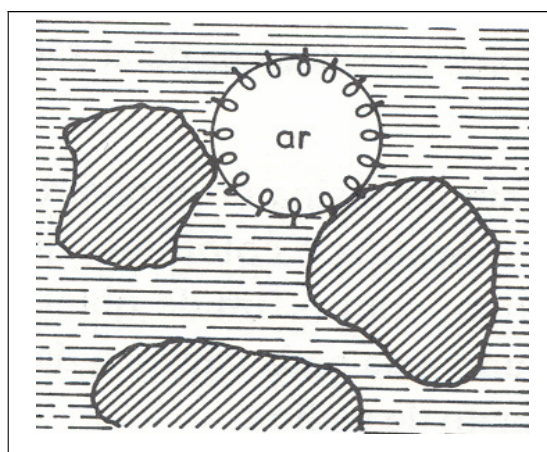


Figura 1.3: A presença do introdutor de ar promove a formação de bolhas estáveis entre os grãos de cimento e agregados [1].

As bolhas são tanto mais estáveis quanto mais comprida a cadeia dos átomos de carbono mas a utilização destas substâncias com cadeias muito longas pode mesmo promover um aumento da viscosidade, diminuindo a trabalhabilidade do material [1,13].

O ar introduzido sob a forma de bolhas funciona simultaneamente como um fluido e como um inerte. Como fluido, substitui parte da água de amassadura, pois é possível diminuir a água sem alteração da trabalhabilidade do material; como inerte, substitui parte da areia, com partículas de dimensões inferiores a 1 ou 2 mm, com a vantagem de ter melhor coeficiente de forma, ser deformável, elástico

e poder deslizar sem atrito, ou seja, contribui para melhorar a trabalhabilidade do material fresco [1,13].

### ***Agentes retentores de água***

Nas argamassas é comum a utilização de agentes retentores de água [16]. O valor da retenção de água de uma argamassa, é o teor de água que permanece na argamassa após desidratação capilar pelo substrato absorvente onde é aplicada ou pelas condições atmosféricas [17]. Uma vez que as argamassas à base de cimento ou gesso necessitam de água para a presa, esta água deve ser retida pela argamassa por um período de tempo mais longo. Estes adjuvantes tornam-se assim necessários para reter a água até à reacção de presa, sendo responsáveis pelos elevados valores de retenção de água das formulações de argamassas recentes.

Os agentes retentores de água são também conhecidos como agentes espessantes uma vez que aumentam a viscosidade e a coesão dos materiais cimentíceos. Tal aumento é essencial em sistemas fluidos para reduzir a segregação dos materiais constituintes e melhorar a homogeneidade e outras propriedades do produto endurecido [18,19,20]. Um outro efeito atribuído a estes adjuvantes é o de melhorarem a trabalhabilidade e a adesão nas argamassas em que são inseridos [16].

Os agentes espessantes são basicamente constituídos por polímeros solúveis em água, embora sejam também utilizados para este fim outros materiais. K.H. Khayat [18] classifica estes materiais de acordo com a sua natureza e acção física:

- Classe A: polímeros orgânicos naturais ou sintéticos solúveis em água, que aumentam a viscosidade das suspensões aquosas, entre os quais se incluem os éteres de celulose, os óxidos de polietileno e o álcool polivinílico;
- Classe B: floculantes orgânicos solúveis em água, que adsorvem nos grãos de cimento aumentando a sua viscosidade pelo acréscimo da atracção interpartículas, tais como, os copolímeros de estireno com grupos

carboxílicos e as gomas naturais;

- Classe C: emulsões de vários materiais orgânicos que aumentam a interacção entre partículas, das quais se destacam as emulsões acrílicas;
- Classe D: materiais inorgânicos expansíveis com a água, de elevada área superficial, que aumentam a capacidade de retenção de água, tais como, as bentonites e o fumo de sílica;
- Classe E: materiais inorgânicos de elevada área superficial, que aumentam o teor de partículas finas na pasta e consequentemente a tixotropia. Destacam-se, neste caso, as cinzas volantes, cal hidratada e o caulino.

Os agentes retentores de água mais utilizados são os derivados de éteres de celulose, dos quais se destacam o metilohidroxipropil de celulose (MHPC) e o metilohidroxietil de celulose (MHEC). Em sistemas à base de cimento, a água permanece fisicamente ligada ao éter de celulose devido à sua natureza hidrófila, o que resulta num aumento de viscosidade da fase aquosa [21]. Com isso, a mobilidade da água e o transporte de iões são inibidos, tornando todas as reacções de hidratação mais lentas e causando atraso na presa e endurecimento. Além disso, as moléculas de polímero podem ser adsorvidas na superfície dos grãos de cimento dificultando a sua dissolução [18].

## 1.2. Comportamento Reológico

### 1.2.1. Reologia das Argamassas

O estudo das propriedades reológicas dos materiais cimentícios é crucial para a sua caracterização no estado fresco e estabelecimento das propriedades adequadas a cada tipo de aplicação. A reologia é a ciência do fluxo e deformação dos materiais, estudando as relações entre a tensão, deformação e tempo [11,12].

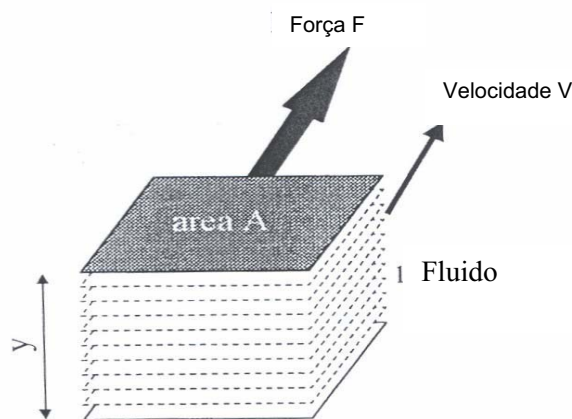


Figura 1.4: Modelo do fluxo de um fluido sob acção de corte [22].

O fluxo está relacionado com os movimentos de camadas adjacentes dos elementos de fluido, ou seja, quando uma força de corte é aplicada a um fluido, um gradiente de velocidade é induzido sobre ele (figura 1.4). O factor de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade é denominado viscosidade e o gradiente de velocidade é igual à taxa de deformação.

Um fluido que obedece a esta relação é denominado de Newtoniano e comporta-se de acordo com a equação  $F/A = \tau = \eta \cdot \gamma$ , onde  $\eta$  é a viscosidade,  $\gamma$  é a taxa de deformação,  $\tau$  é a tensão de corte,  $F$  é a força de corte e  $A$  a área do plano paralelo à força. Na figura 1.5 podem observar-se diversos comportamentos de fluidos ideais [11,22,23].

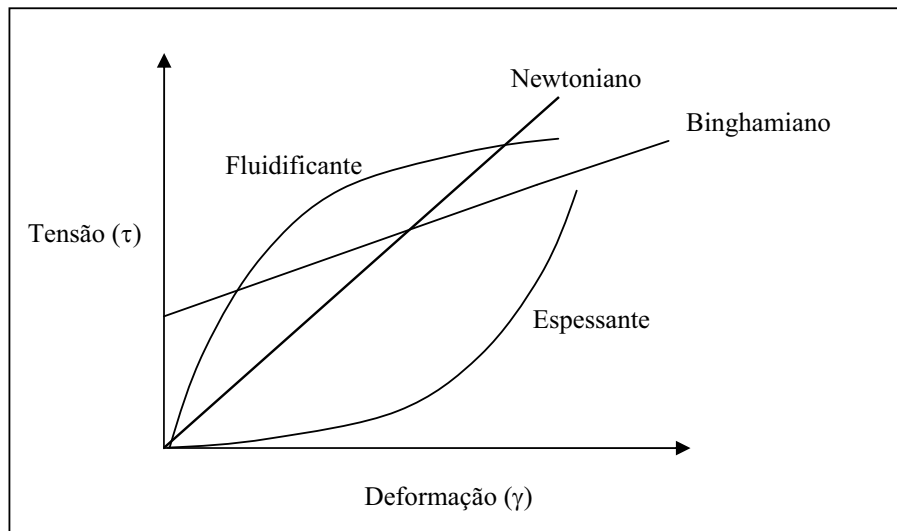


Figura 1.5: Curvas de fluxo para fluidos ideais.

Nos fluidos newtonianos, devido ao facto de a relação entre a tensão de corte e a taxa de deformação dar origem a uma recta que passa pela origem do gráfico e ao facto da viscosidade ser constante, a medição da deformação para uma única velocidade de corte é suficiente para o caracterizar, ou seja, basta a viscosidade para avaliar as propriedades reológicas do fluido.

Outros fluidos apresentam um comportamento mais complexo e são referidos como não Newtonianos (figura 1.5). São exemplos característicos os fluidos pseudoplásticos ou Binghamianos.

Os fluidos pseudoplásticos, descritos através da equação  $\tau = A\gamma^n$ , são fluidos que apresentam um comportamento não linear com a aplicação da força. Especificamente, quando  $n < 1$  estes fluidos apresentam um comportamento tal que fluidificam sob acção de corte. Quando  $n > 1$ , apresentam um comportamento dilatante ou espessante perante a acção de corte. Em ambos os casos, trata-se de um comportamento não-linear, onde a viscosidade não é uma constante [11,12,24].

Os fluidos Binghamianos são caracterizados por uma relação do tipo  $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$ . Apresentam uma relação linear entre a tensão e a deformação a partir de um determinado valor da tensão de corte (tensão de Bingham ou tensão de cedência,  $\tau_0$ ). Isto é, são materiais que resistem sem fluir a tensões de corte inferiores à



tensão de cedência, mas acima desta apresentam um comportamento linear entre a tensão de corte e a taxa de deformação, sendo caracterizados por uma viscosidade plástica ( $\mu$ ).

Relativamente aos sistemas cimentícios, que a uma escala macroscópica se comportam como um fluido, o nº de Deborah ( $De = t_r / t_0$ ) indica se o tipo de comportamento do material é viscoso ou elástico. Quando o tempo de relaxação,  $t_r$ , é da mesma ordem de grandeza do tempo característico para as medições experimentais,  $t_0$ , o material exhibe ambos os comportamentos e é denominado de viscoelástico. Este tipo de comportamento é observado em dispersões concentradas de sólidos em água, desde que as forças interpartículas resultantes das cargas superficiais e da dupla camada elétrica promovam valores de  $t_r$  e  $t_0$  da ordem dos  $10^{-4}$  a  $10^4$  segundos, valores que se ajustam aos tempos de medição típicos da maioria dos equipamentos de laboratório [23,25]. A análise mais simples do comportamento viscoelástico envolve o modelo de Bingham [22-24]. De facto, o comportamento reológico típico das argamassas é normalmente descrito pelo modelo Binghamiano. Neste modelo, o material é um sólido elástico a tensões de corte ( $\tau$ ) inferiores à tensão de cedência ( $\tau_0$ ), mas apresenta um comportamento viscoso a tensões de corte superiores, sendo  $\mu$  a viscosidade plástica e  $\gamma$  a taxa de deformação. É importante salientar que a viscosidade apenas pode ser medida se a tensão de cedência for excedida. Para o material, a tensão de cedência é o valor no ponto de interseção da recta com o eixo da tensão, e a viscosidade plástica é o valor do declive da recta [22,23,25].

A existência da tensão de cedência pode ser comprovada através da utilização de:

- (i) reómetros de tensão de corte controlada, onde se mede a tensão de corte necessária para iniciar o fluxo [26];
- (ii) penetrómetros, onde pode ser medida a força necessária para introduzir uma agulha [27];
- (iii) veios, nos quais é medida a tensão de corte para destruir a estrutura interna do material e colocar o material em movimento [28];
- (iv) medidores de tensão de corte pulsada [29], onde o módulo da tensão pode ser determinado através da velocidade de propagação de uma onda de tensão, ou

então através de uma tensão rotacional e translacional oscilatória, capaz de separar as componentes elástica e viscosa do material [30,31].

Uma simples observação visual pode confirmar a existência de uma tensão de cedência, pois o material é capaz de suportar o seu próprio peso. A tensão de cedência resulta das forças de atracção entre moléculas ou partículas sólidas em suspensão [24].

Enquanto medições a uma velocidade de corte são suficientes para caracterizar um fluido Newtoniano, nos líquidos não Newtonianos são necessárias mais do que uma velocidade. Em teoria duas velocidades seriam suficientes, mas é preferível utilizar uma sequência de velocidades para garantir um mínimo de erros experimentais [23,24]. A partir desta sequência de velocidades torna-se possível desenhar a curva de fluxo, tensão de corte em função da deformação, e através da ordenada na origem determinar a tensão de cedência e pelo declive da recta obter a viscosidade plástica do material.

Em suspensões concentradas de sólidos em líquidos, tal como os sistemas cimentícios, a proximidade das partículas dá origem a fortes interacções, cuja força depende da forma das partículas, do seu tamanho e distribuição de tamanhos, concentração, tipo de superfície e da composição do líquido [23].

Normalmente, devido ao movimento aleatório das partículas que provoca o choque entre elas e consequente aglomeração, existe uma atracção natural que causa floculação. O tamanho e forma dos flocos são os principais responsáveis pela reologia das dispersões. Através de agitação vigorosa, os flocos são separados nas suas partículas primárias, sendo este processo acompanhado de uma redução da resistência ao fluxo. Retirada a agitação verifica-se uma refloculação e aumento da resistência ao fluxo e, se esta recuperação da estrutura for completamente reversível, é denominada tixotropia. No caso de pastas de cimento e argamassas é preferível falar em destruição e reconstrução da estrutura uma vez que se verifica que a estrutura destruída não é totalmente recuperada, ou seja, existe uma destruição estrutural irreversível [23].

Nos materiais cimentícios as propriedades de fluxo são governadas pela interface entre o sólido e a água e, em termos de área superficial de contacto, a contribuição dominante é devida à interface cimento água. Este facto é

progressivamente diluído pelo aumento de teor em agregados. Outro factor que afecta as propriedades de fluxo é o tamanho de partícula dos agregados. A tensão de cedência e a viscosidade plástica aumentam com o tamanho dos agregados sendo a destruição estrutural irreversível mais significativa nas pastas de cimento, verificando-se ainda a sua ocorrência nas argamassas mas já não sendo detectada em betões [23,32].

Os fluidos Binghamianos mostram um comportamento dependente do tempo, na forma de uma redução na taxa de deformação, sendo este efeito mais visível para velocidades de corte elevadas. Na figura 1.6 pode observar-se este efeito. Estes materiais sofrem destruição estrutural quando submetidos a uma acção de corte, indicada pelo decréscimo do torque medido com o tempo [33].

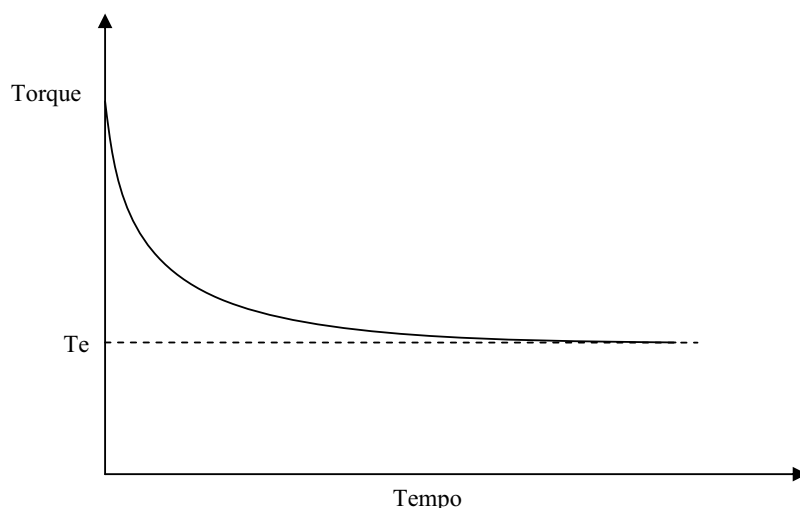


Figura 1.6: Variação do torque com o tempo a velocidade de corte constante [33].

Quando se atinge o valor de equilíbrio do torque ( $T_e$ ) a estrutura pode estar totalmente destruída ou então existe equilíbrio entre a velocidade de destruição e a velocidade de reconstrução. Esta destruição estrutural, causada pela tensão de corte aplicada durante o decorrer do teste, também provoca um comportamento de histerese na curva de fluxo [24]. Banfill e Saunders [34] demonstraram que a forma da curva de histerese depende do tempo, de subida e descida, utilizado para o ciclo de teste. Se para ciclos curtos se observa apenas destruição estrutural, à medida que o tempo do ciclo aumenta, começa a verificar-se a

existência de reconstrução estrutural. Estes autores explicaram estas alterações em termos de uma competição entre a destruição induzida pela acção da tensão de corte e a reconstrução induzida pela hidratação, enquanto outros como Hattori e Izumi [35] explicam o efeito em termos de competição entre processos de coagulação e desfloculação.

A tensão de cedência e a viscosidade plástica, em qualquer momento, dependem da história prévia da amostra, incluindo a força aplicada na sua preparação, no seu manuseamento e no decurso do teste [24]. De facto, Banfill [36,37] comprovou a importância da história prévia de corte na amostra submetendo a mesma argamassa a diferentes procedimentos de mistura (manual, automática a baixa e a alta velocidade). Verificou que a área encerrada na curva de histerese resultante ia diminuindo progressivamente, desaparecendo para a velocidade mais rápida de mistura, o que significa que a curva de fluxo se apresenta sem histerese, ou seja, ocorre destruição estrutural completa. Khayat et al [20] consideram que a área confinada em cada curva de fluxo é proporcional à energia necessária para destruir a estrutura (figura 1.7). Williams et al [38] medem a extensão da destruição estrutural desta forma, variando parâmetros como a velocidade de mistura e o tipo de misturadora.

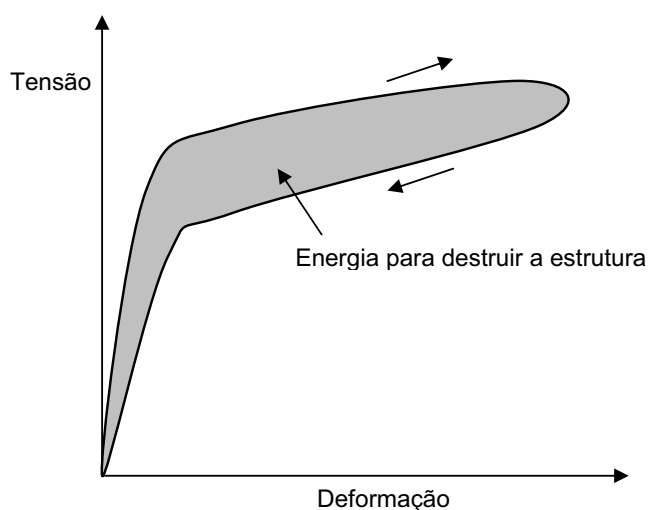


Figura 1.7: Curva de fluxo com histerese de um material cimentício [20].

A curva de histerese evidencia que ocorre destruição estrutural durante os testes, sendo possível obter uma infinidade de curvas de histerese por alteração dos parâmetros experimentais. Em consequência, as curvas de histerese não permitem caracterizar sem ambiguidade a destruição estrutural nos fluidos Binghamianos. No entanto, se a estrutura for completamente destruída na preparação e manuseamento do material, a curva de fluxo descendente, correspondente à descida da velocidade de corte, comporta-se de acordo com o modelo de Bingham, sendo possível determinar a tensão de cedência e a viscosidade. Alternativamente, quando a preparação e manuseamento das amostras não destrói completamente a estrutura, mas decorre de acordo com um procedimento padrão, torna-se possível manter sempre a mesma quantidade de estrutura por destruir aquando do início do teste. Neste caso, a viscosidade e tensão de cedência determinadas, são de confiança como indicadores das propriedades de fluxo, numa escala quantitativa relativa [24].

Tattersal e Banfill [32,37] propuseram um modelo para explicar a destruição estrutural irreversível, o qual tinha em atenção a formação instantânea de uma membrana de minerais hidratados, em redor dos grãos de cimento (período de indução). Esse modelo considera que quando o cimento seco entra em contacto com a água, forma-se uma membrana de produtos hidratados em redor de grupos de partículas. Por acção da tensão de corte essa membrana é rompida e as partículas separam-se. A região onde uma partícula se encontra em contacto com outra é exposta, hidratando para “cicatriz” a interrupção na membrana. Devido a esta “cicatrização”, quando a tensão é retirada, não é possível repor as ligações tal como se encontravam antes da aplicação da tensão, logo a destruição das ligações é irreversível (figura 1.8). Neste modelo, a estrutura destrutível é devida às ligações por pontes das membranas, enquanto que o valor da tensão de cedência é devido a forças de floculação.

Banfill [39] também confirmou que as argamassas, tal como o cimento, apresentam destruição estrutural irreversível e que na curva de velocidade de corte descendente, estas se comportam de acordo com o modelo de Bingham. Convém ter em consideração este modelo de destruição/reconstrução de estrutura durante qualquer procedimento de caracterização reológica.

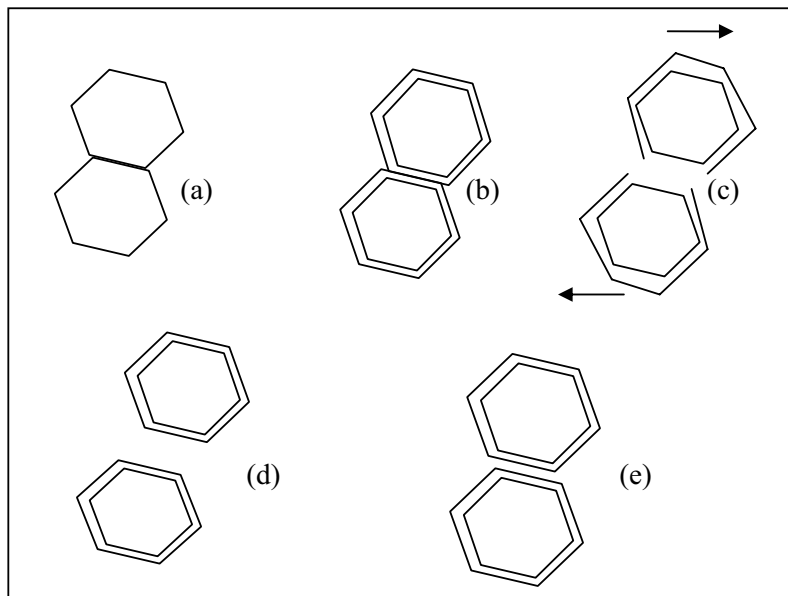


Figura 1.8: Modelo para a destruição estrutural irreversível induzida por acção de corte; (a) Partículas de cimento secas em contacto; (b) Formação de membrana envolvente quando o cimento contacta com água; (c) As pontes das membranas rompem-se sob a acção de corte; (d) Reconstrução das membranas; (e) Em repouso, as membranas aproximam-se para uma distância correspondente ao mínimo de energia repulsiva [23].

### 1.2.2. Métodos de caracterização reológica

Tradicionalmente, o método do espalhamento (EN 1015-3) é a técnica mais usada para caracterizar as argamassas em termos de trabalhabilidade, pois é um processo muito simples, rápido e de fácil instalação no local. Um tronco de cone, aberto em ambas as extremidades é preenchido com o material e colocado sobre uma mesa de espalhamento. Sendo a tensão o peso do material por unidade de área, quando se retira o cone apenas se verifica espalhamento se a tensão de cedência for excedida. Deste modo, pode-se concluir que o primeiro valor de espalhamento medido pode ser relacionado com a tensão de cedência. A segunda medida de espalhamento é efectuada após um número determinado de batidas na mesa, estando este valor também relacionado com a viscosidade pois, se existir escoamento, a tensão aplicada excedeu a tensão de cedência. Uma vez que não permite uma medida discriminada destes dois parâmetros reológicos torna complicado um tratamento analítico do comportamento reológico. Pode, no

entanto ser um auxiliar precioso de caracterização reométrica, ao permitir conhecer o estado de consistência da argamassa e se esta se encontra ou não dentro da zona de trabalhabilidade [23].

Aparentemente, para caracterizar uma argamassa através dos dois parâmetros fundamentais, um reómetro de cilindros coaxiais seria o ideal, pois as equações de fluxo podem ser expressas com precisão, tal como Banfill [36] demonstrou. No entanto, existem regras bem estabelecidas para as dimensões dos aparelhos de medição que limitam a sua utilização. Em primeiro lugar, o tamanho do espaço entre o cilindro interior e exterior deve ser, no mínimo, dez vezes o tamanho da maior partícula presente na argamassa, de forma a minimizar os efeitos de falta de homogeneidade no empacotamento das partículas junto às paredes dos cilindros. Em segundo lugar, a relação entre o raio do cilindro exterior e o raio do cilindro interior não pode ser maior que 1.2, de forma a assegurar que a variação na velocidade de corte do material, ao longo do intervalo entre cilindros, seja a menor possível. Por último, a relação entre a altura e o raio do cilindro não pode ser menor que 1 para minimizar a interferência do fundo. Estes factores implicam que para se cumprirem estas regras, tendo em conta as dimensões das partículas dos agregados presentes numa argamassa (típicamente até 5 mm), os aparelhos apresentariam dimensões tão grandes que os tornam impraticáveis. Estes princípios aplicados ao viscosímetro de cone e prato levam às mesmas conclusões, pois o espaço de separação (*gap*) é zero junto ao extremo do cone [23,34,39].

Tattersal e Banfill [32] mostraram que é possível testar as misturas frescas de betão em misturadoras e obter a informação necessária para criar uma curva de fluxo, sendo para isso necessário que a misturadora tenha mais do que uma velocidade. Este foi denominado o método dos dois pontos. O reómetro Viskomat e o seu antecessor, Viscocorder, são instrumentos comerciais capazes de produzir curvas de fluxo de acordo com este princípio.

O Viskomat consiste num contentor cilíndrico onde se introduz a amostra de argamassa, sendo depois colocado num suporte com velocidade de rotação variável. Uma pá concêntrica é montada numa cabeça que mede o torque, pois à medida que o cilindro roda, a resistência viscosa da argamassa ao fluxo através

das lâminas da pá dá origem a um torque.

Durante qualquer ensaio, em que a amostra é sujeita a um determinado programa de velocidade, monitoriza-se o torque electronicamente de forma contínua. A curva de fluxo pode ser construída sob a forma de torque (T) em função da velocidade de rotação (N) e, no caso das argamassas, o seu comportamento é descrito pela equação  $T = g + hN$ , sendo g e h constantes características do material [24,40].

Banfill [25,40] confirmou experimentalmente que g e h são directamente proporcionais à tensão de cedência e à viscosidade plástica, respectivamente. Para tal, determinou as constantes de proporcionalidade entre estas variáveis através de um processo de calibração do reómetro (Viskomat), utilizando líquidos de características reológicas conhecidas e seguindo um procedimento descrito nas referências citadas. Segundo este mesmo autor, para este tipo de reómetro tem-se  $\tau_0 = (K/G)g$  e  $\mu = (1/G)h$ , sendo K igual a 10.1 e G igual a  $1.29 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , o que permite a conversão de Nmm para  $\text{Nm}^{-2}$  no caso da tensão de cedência e de Nmms para  $\text{Nm}^{-2}\text{s}$  no caso da viscosidade. No entanto, é bastante comum, na literatura da especialidade, os autores discutirem as variações da tensão de cedência ( $\tau_0$ ) e da viscosidade ( $\mu$ ) em termos da variação de g e h.

Relativamente aos procedimentos do teste reométrico, Banfill [23] considerou que devido à existência de destruição/reconstrução no comportamento dos materiais cimentícios, a sua reologia é melhor estudada através de testes onde a velocidade de corte é mantida constante. No entanto, Banfill [23,41] e outros autores [42] também utilizam outras rotinas de teste, nomeadamente, a subida e descida em escada da velocidade de corte com o tempo, de forma a obter valores de equilíbrio de torque para o cálculo das propriedades de fluxo, a tensão de cedência e a viscosidade plástica.



### **1.2.3. Efeito de adjuvantes sobre o comportamento reológico**

No estado fresco os materiais cimentícios, constituem suspensões muito concentradas cujo comportamento reológico é geralmente muito complexo, dependendo de diversos factores de natureza diferente, tais como [43]:

- Factores físicos (relação água/cimento, distribuição granulométrica e forma das partículas de cimento e agregados);
- Factores mineralógicos e químicos (composição do cimento);
- Condições de mistura (tipo de misturadora, taxa e tempo de mistura);
- Condições de medida (instrumentos e procedimentos de medida);
- Presença de adjuvantes.

Contudo, o estudo da influência destes parâmetros na reologia das argamassas não tem sido muito extenso, uma vez que a atenção principal foi direccionada para o efeito sobre as características do produto endurecido.

Banfill [24,41,44] é um dos autores que tem efectuado, nos últimos anos, um estudo sistemático sobre a reologia de materiais cimentícios. Nestes trabalhos pode-se encontrar o efeito de componentes como a água de amassadura, os agregados (areia) e alguns adjuvantes sobre o comportamento reológico da argamassa. O aumento da água de amassadura apresenta um efeito evidente sobre os parâmetros reológicos, na forma de uma diminuição acentuada da viscosidade e tensão de cedência (figura 1.9). Em relação aos agregados, o principal parâmetro estudado foi a granulometria da areia utilizada nas argamassas. Neste caso, o aumento da fracção granulométrica mais fina tem como consequência um aumento da tensão de cedência e da viscosidade, para o mesmo teor de água.

Quanto aos adjuvantes, os mais estudados em termos reológicos, têm sido os agentes plastificantes e os agentes retentores de água, também conhecidos por agentes modificadores de viscosidade [16,18,19,45]. Outros adjuvantes, como os agentes introdutórios de ar, têm sido menos estudados, o que talvez decorra do facto da sua acção principal ser direccionada para a modificação de características do produto endurecido, tal como a resistência ao gelo/degelo [14,15,46].

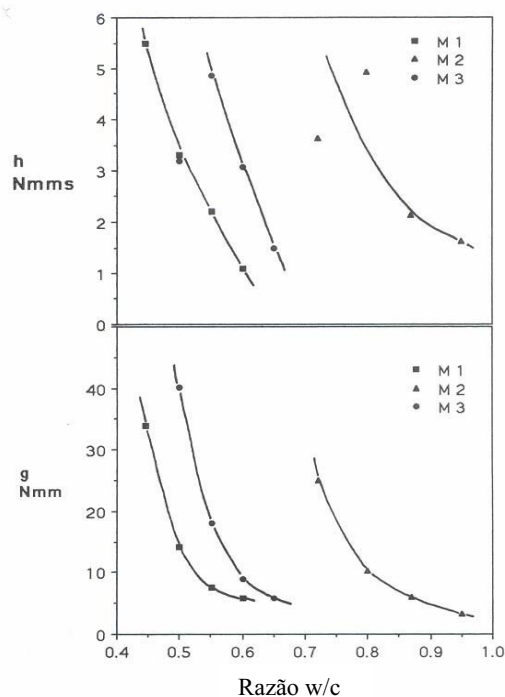


Figura 1.9: Efeito da água de amassadura sobre a viscosidade (ou coeficiente h) e a tensão de cedência (ou coeficiente g) [24].

O uso de agentes retentores de água num sistema cimentício reduz a quantidade de água livre disponível para a lubrificação do material fresco, o que contribui para um aumento da viscosidade e tensão de cedência [16,18,19]. Khayat [18] verificou que um aumento da quantidade deste agente tornava necessária a adição simultânea de um adjuvante redutor de água ou plastificante para garantir uma boa consistência através do aumento da fluidez. Este resultado foi confirmado por Lachemi et al [19] mas verificaram que para pequenas quantidades de retentor de água, se nota um aumento de viscosidade e diminuição da tensão de cedência. Este facto é realçado por Green et al [47] que, ao analisar as características de retenção de água de várias argamassas, observaram que apenas a partir de uma concentração crítica deste tipo de adjuvante a retenção se torna mais efectiva. Relativamente aos agentes plastificantes, a sua acção principal é a redução da viscosidade e da tensão de cedência, permitindo uma redução da quantidade de água de amassadura sem alterar a trabalhabilidade [24,42,48-50]. O mecanismo

principal responsável pelo aumento de fluidez está relacionado com a dispersão de partículas de cimento devido à adsorção de moléculas deste adjuvante [43,50,51]. Alguns autores [43,52-54] verificaram ainda que, para além do aumento do teor de plastificante, também o atraso no tempo de adição deste adjuvante era responsável por uma diminuição daqueles parâmetros reológicos bem como pelo atraso no tempo de presa.

Foi realçado [43,55] que alguns agentes plastificantes podem apresentar, para concentrações elevadas, um comportamento espessante sob acção de corte, devido ao desenvolvimento de cadeias poliméricas longas (caso dos poliacrilatos) que provocam uma agregação das partículas.

Em relação aos agentes introdutores de ar, Banfill [24,41] foi dos poucos autores a avaliar o seu efeito na reologia, verificando que ocorre diminuição da viscosidade com o aumento do teor de ar introduzido na argamassa enquanto a tensão de cedência não apresentava uma variação significativa (figura 1.10). Yang et al [46] também verificaram um aumento do diâmetro de espalhamento, no teste respectivo, com o aumento do teor de ar introduzido.

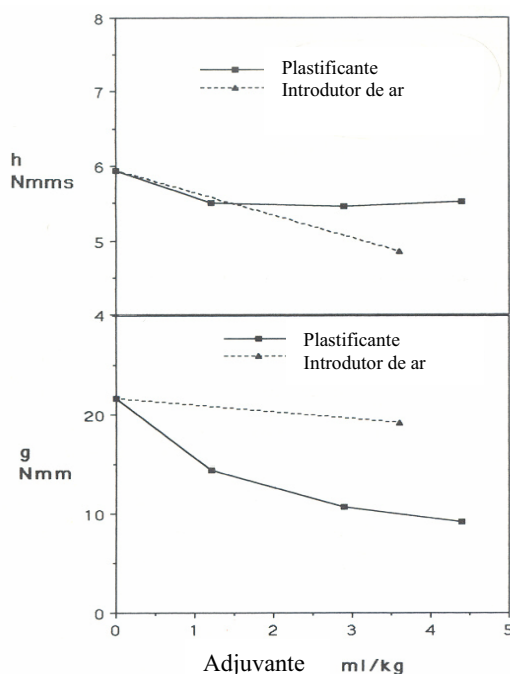


Figura 1.10: Efeito de adjuvantes (plastificante e introdutor de ar) nos parâmetros reológicos de uma argamassa [24].

O estudo da reologia de argamassas tem sido referido como relevante para o desenvolvimento de novos produtos e para a compreensão dos fenómenos responsáveis pelo seu comportamento, pois as propriedades finais do produto endurecido são dependentes das características do produto fresco. A utilização e adequação de novos componentes na formulação de argamassas, nomeadamente, de adjuvantes torna indispensável a avaliação do seu efeito sobre os parâmetros reológicos entre outras características. Espera-se com este trabalho dar um contributo para estimar o efeito de alguns dos adjuvantes mais utilizados no comportamento reológico das argamassas.

## **2. Procedimento Experimental**

### **2.1. Introdução**

Este capítulo pretende descrever a metodologia utilizada ao longo do trabalho. Em primeiro lugar, apresentam-se os materiais utilizados e enuncia-se o processo de preparação das amostras a serem analisadas por qualquer das técnicas experimentais de caracterização. Seguidamente, descrevem-se os métodos experimentais e os procedimentos usados na sua utilização.

O trabalho efectuado visou, por um lado, o estudo e optimização de um método de caracterização do comportamento reológico de argamassas, mediante uso de um reómetro específico. Discutem-se, neste âmbito, dois tipos de teste usados neste estudo de caracterização. Por outro lado, utilizando como base de estudo a mesma argamassa de reboco (monomassa) efectuou-se, com o método desenvolvido, um estudo do efeito da água de amassadura e de alguns adjuvantes essenciais sobre o comportamento reológico da monomassa. Os adjuvantes em análise foram um agente retentor de água, um agente introdutor de ar e um agente superplastificante. Finalmente, procurou-se estabelecer uma correlação entre os resultados da caracterização reométrica e resultados obtidos por um método tradicional de avaliação da trabalhabilidade (espalhamento).

### **2.2. Materiais**

#### **2.2.1. Composição da argamassa base**

A argamassa utilizada neste trabalho é um reboco para aplicação em exteriores em monocamada e, por isso, também é denominada como monomassa. Convencionou-se referenciar como argamassa base (AB) a mistura simples de cimento e agregados, tendo esta sido acondicionada em sacos de 40kg, impermeáveis ao ar, de forma a evitar a adsorção da humidade pelo material. A argamassa base usada durante este trabalho foi preparada de uma única vez,

incidindo assim todos os resultados obtidos sobre o mesmo lote. A preparação desta argamassa foi efectuada nas instalações fabris de uma empresa produtora de argamassas secas (*Weber-St.Gobain*), com base numa formulação comercial de uma monomassa. Na tabela 2.1 apresenta-se a composição desta argamassa base relativamente aos seus componentes individuais, podendo-se verificar a inexistência de qualquer adjuvante.

Tabela 2.1: Composição da argamassa base (AB).

Componentes	%ponderal
Cimento branco	15
Carga siliciosa	73
Agregados leves	2
Carbonato de cálcio	10

O cimento usado é um cimento Portland branco, tipo I, 52.5N. Este tipo de cimento é constituído por 95 a 100% de clínquer, sendo os restantes 0-5% constituintes minoritários.

A areia utilizada possui uma granulometria inferior a 1.250 mm tal como se pode verificar pela análise granulométrica representada na figura 2.1

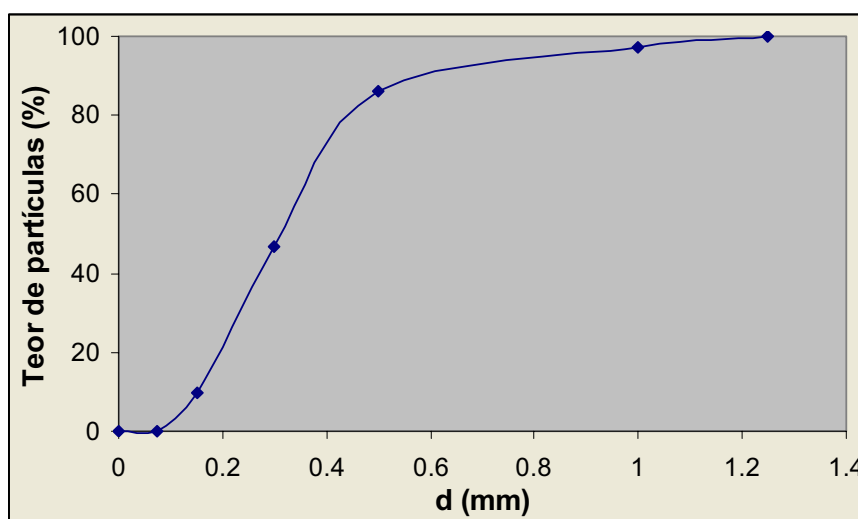


Figura 2.1: Curva granulométrica cumulativa do agregado utilizado na composição da argamassa.

A vermiculite é usada como agregado leve. Relativamente ao carbonato de cálcio, a sua granulometria é inferior a 0.080 mm.

Esta argamassa apresenta início de presa ao fim de cerca de 2 horas a 2 horas e trinta minutos após a mistura, verificando-se o fim da presa e o início de endurecimento aproximadamente 30 minutos depois.

### **2.2.2. Adjuvantes**

Tal como a argamassa base, os adjuvantes utilizados neste estudo foram fornecidos pela empresa Weber-St Gobain, sendo geralmente utilizados na formulação da sua monomassa comercial.

O agente retentor de água utilizado foi o Walocer MK10000 PF30, cuja substância base é o metilhidroxipropil de celulose. Utilizaram-se teores de 0.05, 0.08, 0.10, 0.15 e 0.2% em peso da argamassa base (AB).

Como agente introdutor de ar utilizou-se o Hostapur OSB (Clariant) cuja substância base é o sulfil laureato de sódio. Utilizaram-se teores de 0.01, 0.025, 0.05 e 0.10% em peso da argamassa base seca (AB).

O agente redutor de água de amassadura utilizado foi o Peramin SMF 10 (Perstorp), cuja substância base é a melamina sulfonatada. Utilizaram-se teores de 0.05, 0.10 e 0.50% em peso de material relativo à argamassa base.

### **2.2.3. Água de amassadura**

Em todos os testes usou-se água da rede normal de consumo do município de Aveiro que abastece os laboratórios da Universidade. Não foram efectuados quaisquer testes para determinar a sua composição e variabilidade. Foram testadas argamassas com diferentes teores de água de amassadura (17,19 e 21% em peso de argamassa base).

### 2.3. Caracterização reológica

O procedimento utilizado para a preparação de amostras para ensaiar com o reómetro ou por teste de espalhamento foi igual e descreve-se de seguida:

- Pesa-se 700 gr da argamassa AB para um saco de plástico, numa balança;
- No caso de a composição a preparar incluir adjuvantes, estes pesam-se numa balança analítica e colocam-se no interior do saco onde se encontra a argamassa, fecha-se o saco mantendo algum ar no seu interior e agita-se vigorosamente, de forma a conseguir uma mistura tão perfeita quanto possível entre a argamassa e os adjuvantes.
- Pesa-se a quantidade de água necessária para a taça de amassadura;
- A mistura de argamassa AB com ou sem adjuvantes, que se encontra no interior do saco de plástico é colocada sobre a água dentro da taça de amassadura;
- Com uma pá, mistura-se manualmente de forma a molhar todo o pó;
- Coloca-se a taça no amassador e procede-se à mistura, a uma velocidade lenta (cerca de 60 rpm), durante 30 segundos.
- Desliga-se a misturadora, acomoda-se o material no centro da taça com uma pá e deixa-se repousar o material durante 1 minuto.
- Nova mistura, à mesma velocidade durante mais um minuto, após o qual a amassadura se encontra finalizada.
- Deixa-se permanecer o material em repouso, sempre durante 10 minutos e apenas depois se efectua a caracterização do material.

Em ambas as situações os teores de adjuvantes e de água de amassadura a adicionar são determinados relativamente à quantidade de argamassa base seca (AB), isto é relativamente ao peso seco de cimento mais agregados.

A tabela 2.2 apresenta um resumo das composições ensaiadas nos dois tipos de caracterização.



Tabela 2.2: Composições de argamassas ensaiadas

Denominação	Teor de adjuvantes (%)	Teores de água utilizados (%)
Argamassa base (AB)	0	19; 21
AB+Agente retentor de água (EC)	0.01; 0.02; 0.08; 0.10;0.15;0.20	17;19;21
AB+Agente introdutor de ar (IA)	0.01;0.025;0.05;0.10	17;19;21
AB+Agente redutor de água (SP)	0.01;0.05;0.10;0.50	17;19;21
AB+EC+IA	0.08 EC+ (0.01;0.025) IA	17;19;21

### 2.3.1. Reometria

O reómetro utilizado (Viskomat) foi especificamente desenhado para medir o comportamento reológico de argamassas. O Viskomat (figura 2.2) consiste num contentor cilíndrico onde a amostra é colocada quando já devidamente misturada, sendo este copo depois montado num suporte de rotação variável. Uma pá concêntrica de geometria adequada está montada numa cabeça que mede o torque, pois à medida que o copo roda, a resistência viscosa que a argamassa oferece ao fluxo através das lâminas da pá origina um torque que é continuamente registado eletronicamente ao longo de toda a duração do ensaio. Este reómetro é adequado para medir argamassas contendo partículas com dimensão até 2mm.



Figura 2.2: Reómetro utilizado para argamassas (Viskomat).

Como foi atrás referido, a velocidade de rotação do copo pode ser variável de acordo com o tipo de teste programado. O tipo de teste a efectuar é definido pelo operador através de perfis de velocidade em função do tempo.

Neste estudo utilizaram-se dois tipos de perfis. O primeiro perfil, denominado patamar, é um perfil onde a velocidade permanece constante, a 160 rpm, ao longo de cerca de 60 minutos, embora com descidas de velocidade periódicas, de 15 em 15 minutos, em que a velocidade decresce até zero em 30 segundos e logo a seguir aumenta no mesmo período até às 160 rpm iniciais (figura 2.3). Nas zonas de variação de velocidade, mais especificamente na descida das 160 rpm até zero, podem construir-se as curvas de fluxo.

As curvas de fluxo são representações da variação do torque em função da velocidade de rotação, a partir das quais é possível determinar constantes proporcionais à viscosidade plástica ( $h$ ) e à tensão de cedência ( $g$ ) através do declive da recta e da ordenada na origem, respectivamente, considerando tratar-se de um comportamento Binghamiano típico ( $T=g+hN$ ). O valor destas constantes, para cada amostra, também podem ser obtidas directamente através duma função do programa informático pertencente ao Viskomat.

Este perfil em patamar (figura 2.3) foi utilizado para avaliar o comportamento reológico ao longo do tempo para as diversas composições. Também se efectuaram perfis deste tipo para outras velocidades de corte (80 e 120rpm) aquando da escolha da velocidade adequada para o estudo do comportamento reológico.

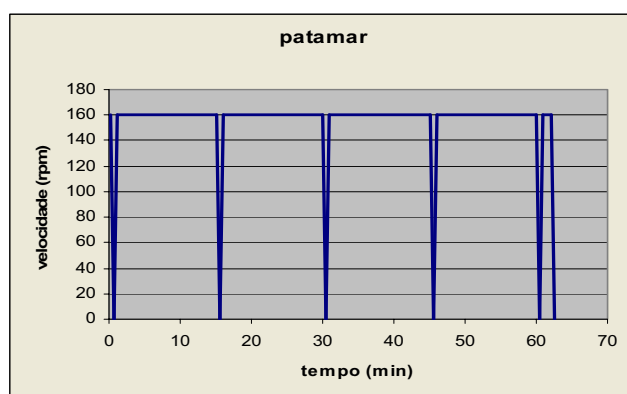


Figura 2.3. Perfil de velocidade em patamar

O segundo perfil, denominado “escada”, é um ensaio em que a velocidade vai variando ao longo do tempo (figura 2.4). Inicialmente o material é sujeito a uma agitação à velocidade de 200 rpm durante o tempo suficiente para que se obtenha a destruição estrutural completa do material, depois, a velocidade decresce de 20 em 20 rpm até zero, mantendo-se apenas um minuto em cada patamar, tempo suficiente para que o valor do torque atinja o valor de equilíbrio em cada velocidade.

Neste tipo de ensaio não é possível obter automaticamente a curva de fluxo. Esta é construída manualmente, ou seja, para cada velocidade determina-se o valor de equilíbrio do torque, sendo com esses valores que se desenha a curva de torque versus velocidade e se obtém os valores de  $h$  e  $g$ . Assim sendo, pode-se considerar que este ensaio fornece valores de equilíbrio para a viscosidade e tensão de cedência, enquanto que com o perfil patamar, os resultados refletem a variação instantânea do torque com a velocidade.

Este segundo perfil, em escada, foi utilizado para estudar os efeitos dos adjuvantes e da água de amassadura sobre as características reológicas da argamassa, nomeadamente a viscosidade e a tensão de cedência.

Em ambos os perfis foram ensaiadas três amostras por cada formulação de argamassa.

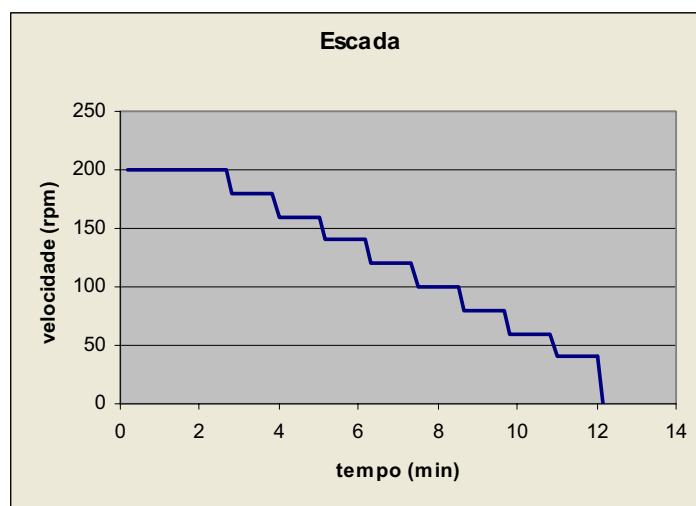


Figura 2.4. Perfil de velocidade em escada.

### 2.3.2. Método de Espalhamento

Este teste é realizado numa mesa (EN 1015-3), cujo tampo se encontra marcado por circunferências concêntricas de diâmetro conhecido, por um copo de geometria tronco-cônica aberto nas duas extremidades e cujo diâmetro interno da base é de 100 mm (figura 2.5). Cada amostra depois de devidamente misturada, de acordo com o procedimento anteriormente descrito, e após dez minutos de repouso, é colocada no interior do copo com a ajuda de uma pá, por forma a acomodar o material o melhor possível mas sem alterar a sua densidade. Depois da amostra se encontrar acondicionada, o copo é depositado sobre o centro da mesa e depois retirado sem o material.



Figura 2.5: Mesa de espalhamento para argamassas

Imediatamente após a retirada do copo, o material pode apresentar um espalhamento inicial sendo esse valor registado como o resultado para o momento zero. Seguidamente, a mesa é sujeita a quinze ressaltos, de acordo com a norma EN 1015-3, que vão originar o espalhamento do material, sendo esse valor registado como valor final. Há contudo que realçar que a mesa de espalhamento usada em laboratório tinha um ressalto de 16 mm, valor superior ao exigido pela norma (10 mm), o que implica que as áreas de espalhamento obtidas tenham sido maiores que as obtidas normalmente para este tipo de materiais.

Este teste foi efectuado em amostras com diferentes adjuvantes, diferentes teores de adjuvante e para diferentes teores de água de amassadura, com o objectivo de

avaliar a trabalhabilidade das argamassas desenvolvidas e correlacionar os valores obtidos com o comportamento medido no reómetro.

### 2.3.3. Caracterização complementar

Uma vez que a utilização de adjuvantes como os agentes introdutórios de ar e redutores de água pode introduzir ar durante a amassadura das argamassas houve necessidade de medir o teor de ar introduzido como forma de complementar o estudo.

A preparação de amostras para determinação de ar introduzido na argamassa foi semelhante à descrita anteriormente. A diferença encontra-se na quantidade de material a preparar, uma vez que o preenchimento do volume do aerómetro requer cerca de 2000 g de argamassa.



Figura 2.6: Aerómetro para determinação de ar introduzido em argamassas.

Para determinar o teor de ar introduzido numa argamassa usa-se um aérómetro (figura 2.6), cujo princípio de funcionamento se baseia na relação entre o volume de ar e a pressão que lhe está aplicada, a temperatura constante, de acordo com a lei de Boyle-Mariotte. No processo de ensaio coloca-se a amostra dentro de um contentor hermético, de volume conhecido, e aplica-se uma pressão conhecida. Devido ao aumento de pressão, acima da pressão atmosférica, o volume do ar presente na argamassa diminui, sendo essa diminuição lida directamente do aparelho que se encontra graduado directamente em percentagem de ar [10].



### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Comportamento reológico de argamassas

O estudo do comportamento reológico foi iniciado com medidas no reómetro (Viskomat) efectuadas na argamassa base, material sem adjuvantes, utilizando o perfil denominado de patamar a três velocidades diferentes.

Na preparação da amostra de argamassa base foi usado um teor de água de 21%, relativamente ao peso total de material seco. Este valor foi escolhido em função da trabalhabilidade determinada pelo método de espalhamento. Através deste método o valor obtido para o diâmetro de espalhamento ao fim de 15 ressaltos foi de 140 mm, situando-se dentro do intervalo considerado ideal (140-160 mm) em termos de trabalhabilidade para este tipo de argamassas (monomassa). Com esta argamassa com 19% de água de amassadura obteve-se um valor apenas de 130 mm, mostrando-se muito difícil de manusear.

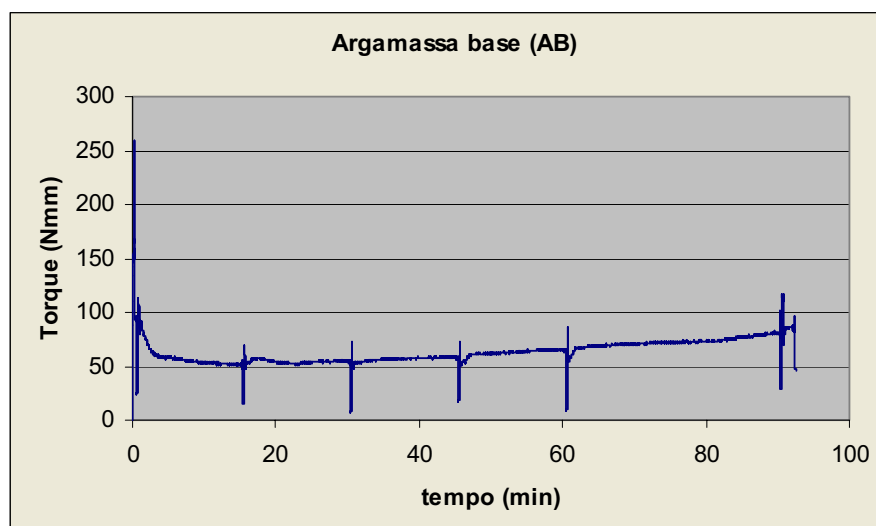


Figura 3.1: Variação do torque em função do tempo de ensaio para a argamassa base com 21% de água de amassadura (perfil patamar a 160 rpm).

A figura 3.1 apresenta a curva típica de variação de torque em função do tempo

de ensaio utilizando um perfil em patamar à velocidade de 160 rpm. O torque começa por aumentar significativamente, como consequência do aumento da velocidade de corte até 160 rpm. Seguidamente, pode-se observar uma diminuição do torque devida à destruição da estrutura, tal como foi referido por Banfill [33], até um valor de equilíbrio que se mantém durante algum tempo. A explicação para a constância observada durante este período pode resultar: (i) da destruição completa da estrutura ou (ii) da existência de equilíbrio entre a velocidade de destruição e a de reconstrução [33]. Após este estágio, cerca de 50 minutos depois do início do ensaio, verifica-se um aumento do torque que pode ser atribuído à aproximação do início de presa, que na argamassa sem adjuvantes, é detectada pelos métodos convencionais (Vicat) cerca de 2 a 2 horas e 30 minutos depois do processo de mistura.

Esta metodologia reométrica permite assim retirar informação sobre o comportamento reológico de argamassas desde o fim da mistura dos componentes até ao início da presa. A reprodutibilidade é bastante elevada como se confirma pela figura 3.2, onde se apresentam resultados obtidos com três amostras da mesma composição.

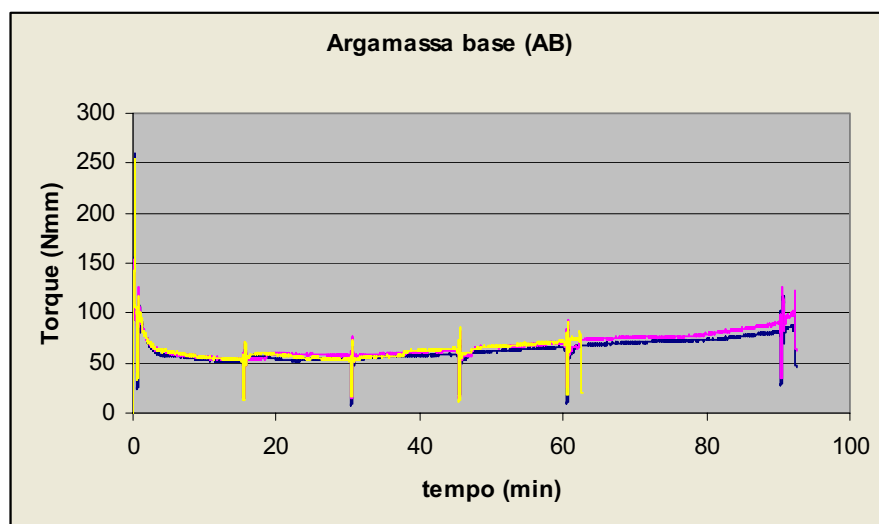


Figura 3.2: Reprodutibilidade da variação do torque em função do tempo da argamassa base em ensaios com perfil em patamar.



Nas figuras 3.1 e 3.2 a existência de decréscimo do valor de torque após o início e aos 15, 30, 45 e 60 minutos deve-se à redução da velocidade de corte até zero e respectiva retoma da velocidade de ensaio, patente na definição do perfil (figura 2.2). É através desta variação de velocidades que se torna possível obter as curvas de fluxo e, assim, determinar os parâmetros reológicos das argamassas em estudo bem como a sua variação ao longo do tempo.

Tal como foi referido, a argamassa base foi testada também às velocidades de 80 e 120 rpm, com o objectivo de avaliar o efeito da velocidade de corte e permitir seleccionar a mais adequada para a realização deste estudo. Na figura 3.3 pode-se comparar as curvas obtidas às diferentes velocidades para a argamassa base. As três curvas têm uma forma semelhante, atingindo-se o valor de equilíbrio de torque sensivelmente ao mesmo tempo, embora seja possível notar que este tempo tende a ser mais curto quanto maior a velocidade de corte. Especificamente, o tempo necessário para atingir o equilíbrio é de aproximadamente 9, 11 e 14 minutos para as velocidades de 160, 120 e 80 rpm, respectivamente.

Até cerca de 60 minutos, o valor de torque permanece praticamente constante, traduzindo o período referido como de equilíbrio. Acima deste tempo verifica-se uma ligeira tendência para aumento do torque. Tal como foi descrito anteriormente, este facto deve-se ao início de presa. Pode-se considerar que durante todo o tempo em que ocorreu o ensaio reométrico o material se encontra no período de indução ou de dormência, durante o qual ocorre hidratação embora a uma velocidade muito baixa, tal como referido por alguns autores [1,4,6].

Na figura 3.4 pode-se observar com detalhe a variação do torque para tempos de ensaio muito curtos. As três curvas apresentam uma subida inicial proporcional ao aumento da velocidade de corte. Após a primeira descida da velocidade até zero, de acordo com o perfil definido, e correspondente retoma da velocidade seleccionada (80, 120 ou 160 rpm), constata-se diferenças entre as três curvas. Assim, enquanto que nas curvas obtidas com 80 e 120 rpm o valor de torque torna a subir acentuadamente, para a velocidade mais elevada o torque recupera o valor anterior ao ciclo de descida/subida de velocidade. Este facto evidencia que a destruição estrutural é mais efectiva a esta velocidade pelo que foi esta a

seleccionada para realizar estudos de acordo com o perfil de patamar.

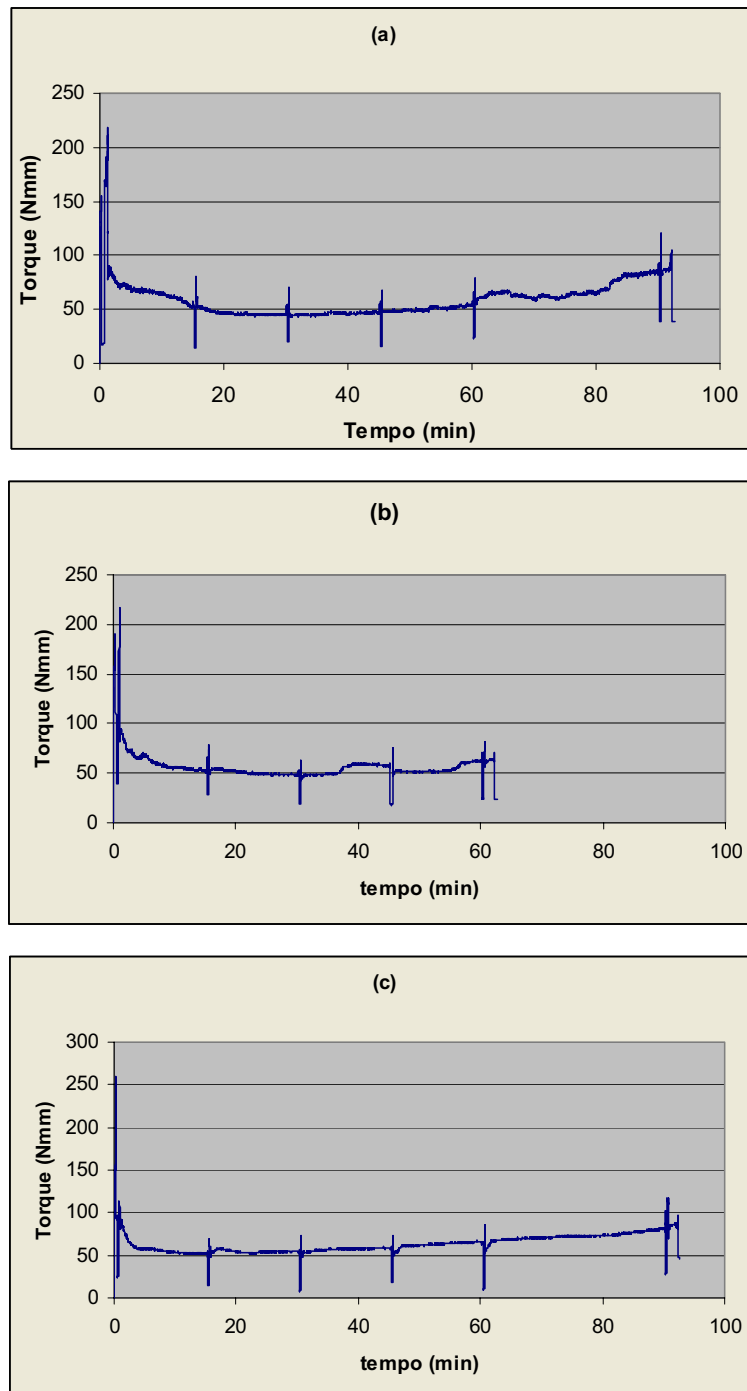


Figura 3.3: Variação do torque com o tempo para (a) 80, (b) 120 e (c) 160 rpm em argamassa base.

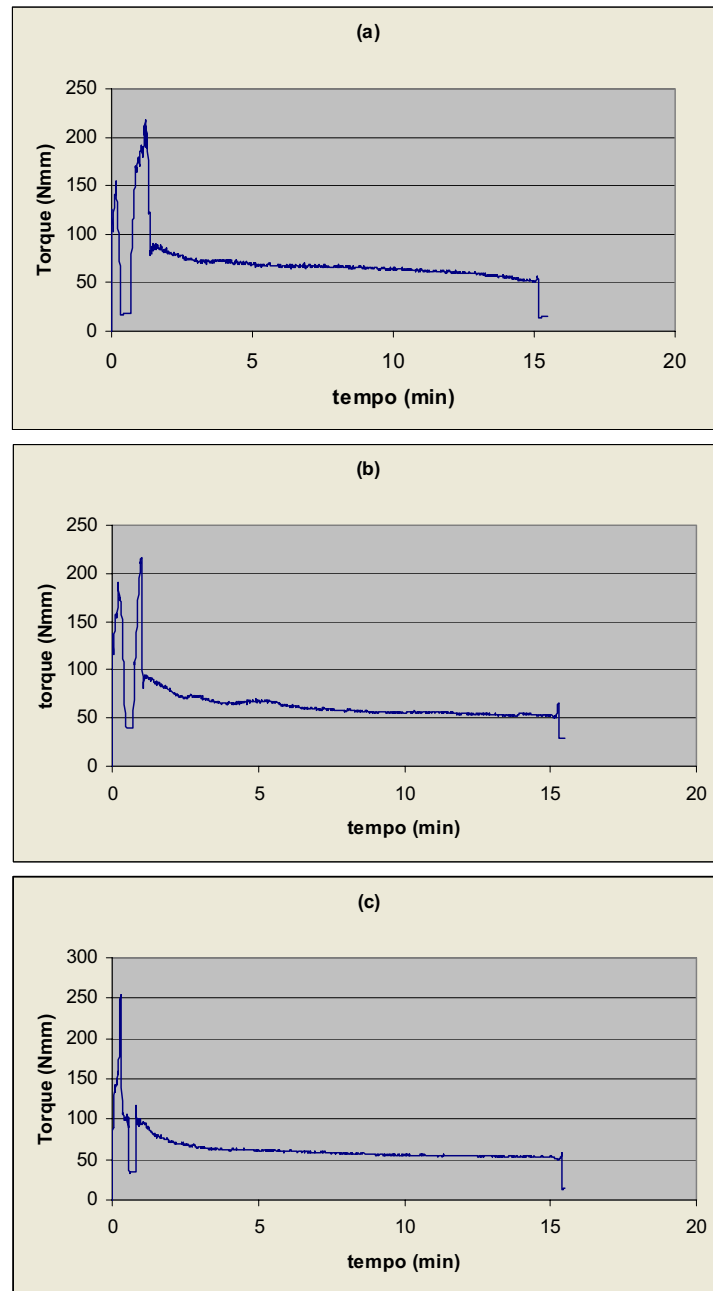


Figura 3.4: Efeito da velocidade de corte sobre a destruição inicial de estrutura da argamassa base:  
(a) 80, (b) 120 e (c) 160 rpm.

Também é possível observar, tal como referido por alguns autores [20,36,38], o fenómeno de destruição estrutural irreversível pela área de histerese das curvas

de fluxo. Assim, a figura 3.5 mostra curvas obtidas com diferentes velocidades de corte e após diferentes tempos de ensaio.

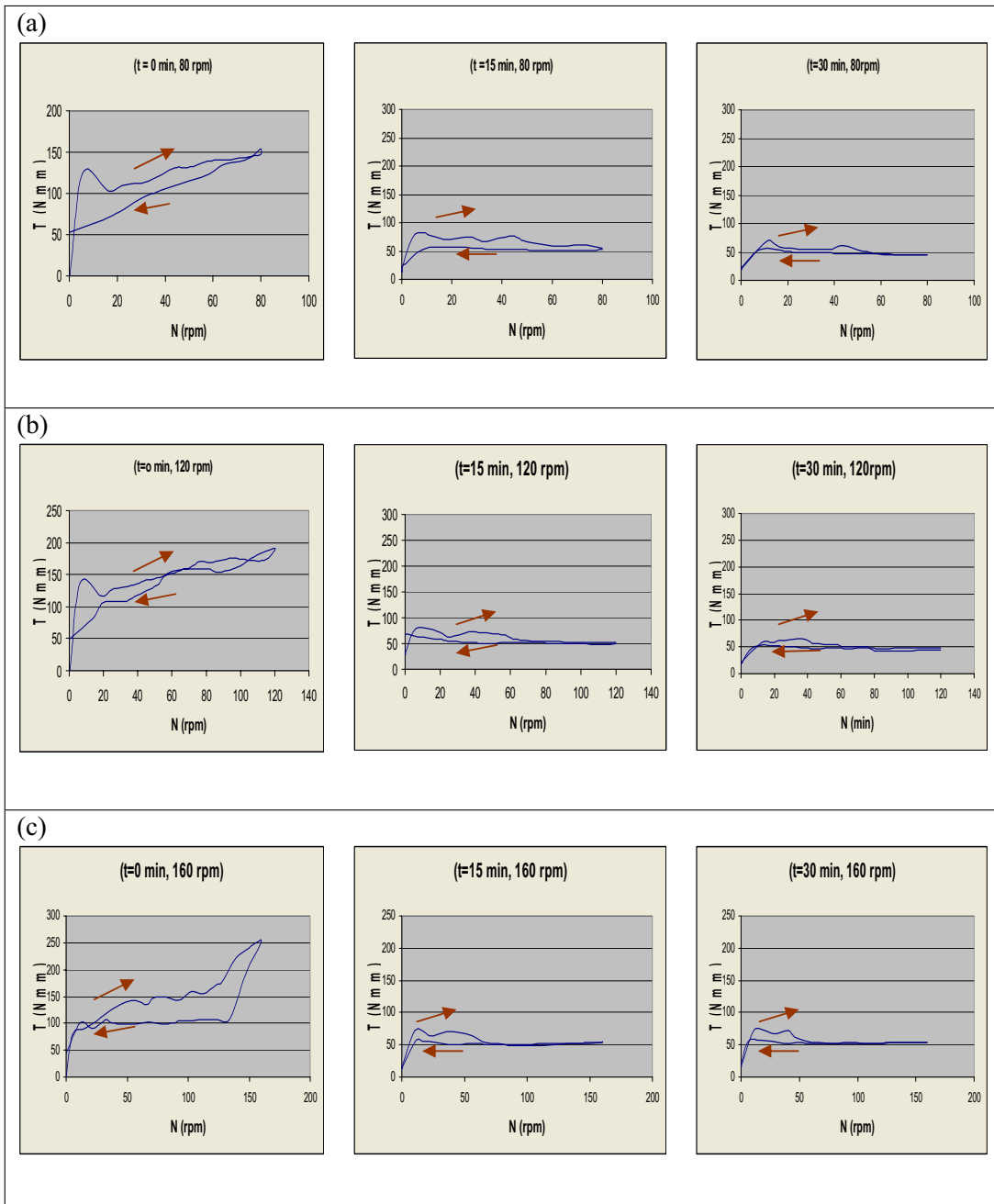


Figura 3.5: Curvas de fluxo obtidas com a argamassa base a 80 (a), 120 (b) e 160 rpm (c) após diferentes tempos de ensaio (0, 15 e 30 minutos). As setas indicam a velocidade ascendente e descendente.

Pode-se constatar que a área de histerese é fortemente reduzida logo a partir dos 15 minutos de ensaio para qualquer das velocidades, permitindo confirmar a destruição estrutural irreversível durante o decorrer do teste. Este facto permite também concluir que as condições de mistura, especificamente a velocidade e tempo, utilizadas para a preparação das amostras não são suficientes para destruir completamente a estrutura da argamassa. De facto, a mistura foi realizada a uma velocidade baixa (60 rpm), suficiente para permitir uma boa homogeneização dos componentes mas incapaz de garantir a destruição estrutural. Para as curvas relativas a  $t=0$  minutos é possível observar para as velocidades mais baixas (80 e 120rpm) a existência de um pico nos valores de torque na curva de velocidade ascendente, ao contrário do que se observa para os valores relativos a 160 rpm. Este facto deve-se a uma destruição estrutural mais efectiva à velocidade superior, tal como já referido para a figura 3.4.

As curvas de fluxo permitem também avaliar o tipo de comportamento e, em particular, verificar se o modelo Binghamiano se ajusta a este tipo de materiais, tal como tem vindo a ser indicado pela maioria dos autores. C. Ferraris [22] efectuou uma revisão detalhada sobre a aplicação de vários modelos de comportamento a argamassas e betões e chegou à conclusão de que a equação de Bingham é aquela que melhor descreve a sua evolução reológica. É também consensual entre todos os autores que, de entre as obtidas em regime de velocidade descendente apresentam maior fiabilidade para a determinação dos parâmetros reológicos ( $g$  e  $h$ ), uma vez que as curvas obtidas com velocidade ascendente refletem frequentemente o fenómeno de reconstrução estrutural decorrente do repouso da suspensão. Isto é patente na figura 3.5 mas a figura 3.6 traduz curvas de fluxo obtidas em regime ascendente e descendente, e torna mais clara esta diferença.

A figura 3.6(a) torna claro que o comportamento de fluxo da argamassa é consistente com o modelo de Bingham, sobretudo quando se considera a curva obtida com velocidade descendente. Na figura 3.6(b) mostra-se a recta de ajuste ao modelo para determinação dos parâmetros  $g$  e  $h$ , de acordo com a equação  $T=g+hN$ . Para tal, foi necessário rejeitar alguns valores de torque relativos às velocidades mais baixas, onde a taxa de reconstrução supera a destruição devida

à agitação, e que resulta em desvios à linearidade da relação entre o torque e a velocidade.

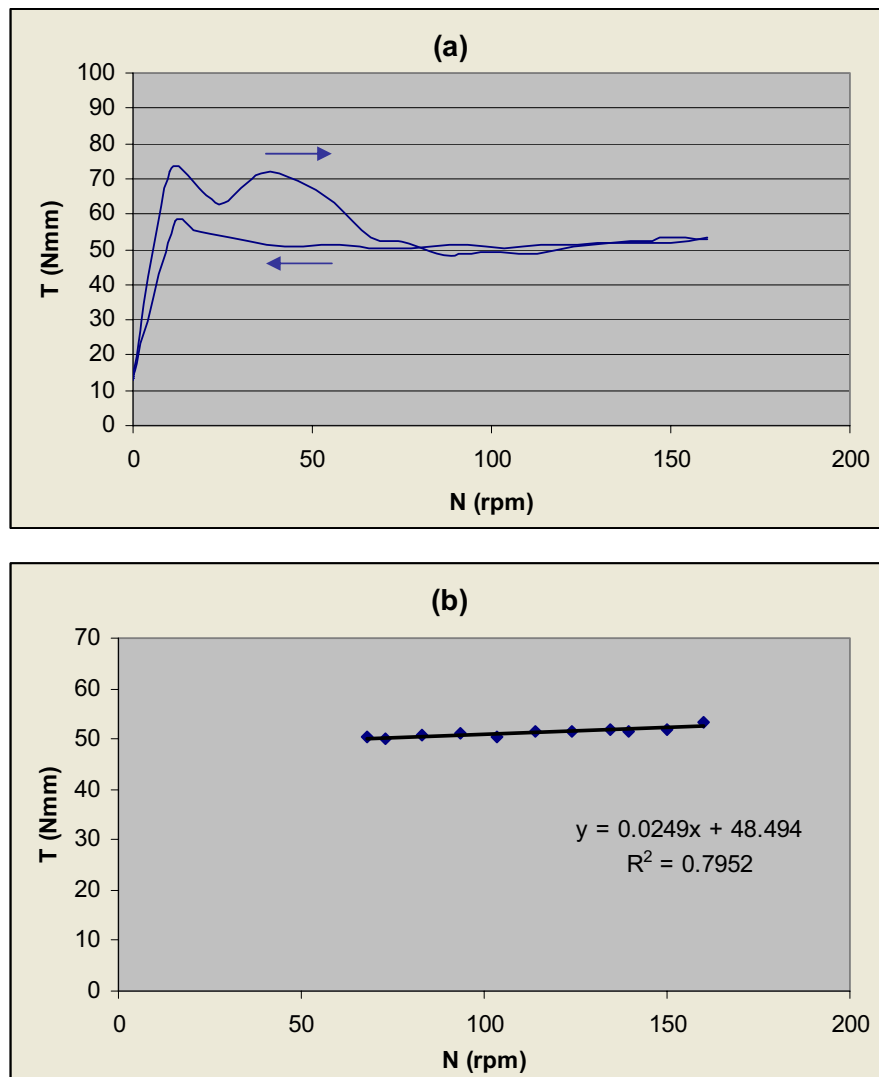


Figura 3.6: Curvas de fluxo da argamassa base obtidas ao fim de 15 minutos de ensaio num perfil em patamar a 160 rpm; (a) curvas com velocidade ascendente e descendente; (b) Determinação dos parâmetros reológicos de acordo com o modelo de Bingham.

Na figura 3.6 (b) indica-se também a equação de fluxo conjuntamente com o factor de correlação resultante. Este valor é muito baixo e indica ajuste deficiente ao modelo de Bingham talvez pelo facto da argamassa base sem adjuvantes ser pouco fluida, e ter comportamento coincidente com o limite inferior de

trabalhabilidade (140mm de espalhamento).

Uma forma de contornar este problema é tomar valores de torque de equilíbrio e não instantâneos. Para isso, em vez de um perfil em patamar, onde as variações de velocidade são contínuas, utiliza-se o perfil em escada (ver figura 2.3) onde se permanece certo tempo em cada valor de velocidade de modo a permitir que o valor de torque atinja o equilíbrio. A figura 3.7 apresenta a curva de fluxo (velocidade decrescente) da argamassa base preparada nas mesmas condições. Pode-se constatar que existe uma melhoria significativa do valor do factor de correlação obtido.

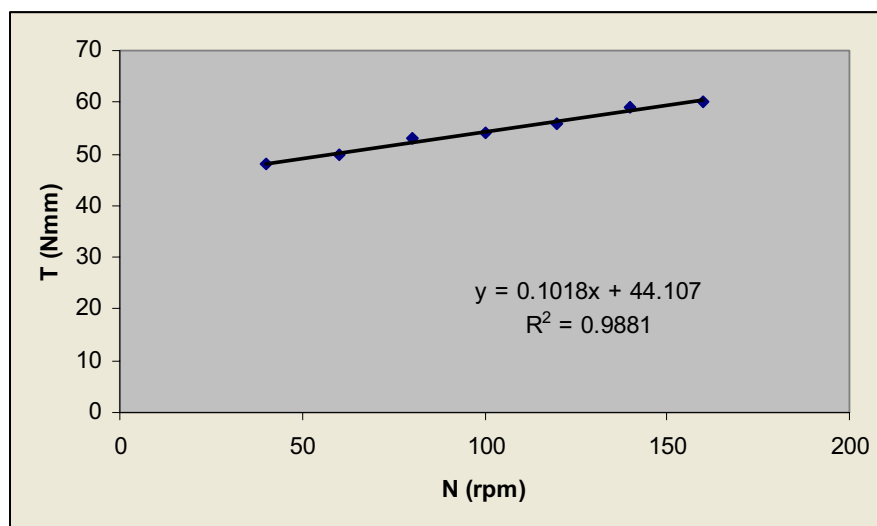


Figura 3.7: Curva de fluxo da argamassa base obtida num perfil em escada (velocidade decrescente)

A equação inserida na figura 3.7 apresenta os valores relativos aos parâmetros  $g$  (44.11 N.mm) e  $h$  (0.102 N.mm.min) para esta argamassa. Utilizando os valores das constantes do aparelho tal como foram determinadas por Banfill [25,40] para este mesmo reómetro (ver secção 1.2.2), a tensão de cedência ( $\tau_0$ ) da argamassa base será de  $347.6 \text{ Nm}^{-2}$  e a viscosidade plástica ( $\mu$ ) de  $4.77 \text{ Nm}^{-2} \text{ s}$ . Estes valores são da ordem de grandeza típicos para argamassas [22,25,40]. No entanto, praticamente todos os autores, incluindo os anteriores, efectuem a discussão dos parâmetros reológicos em termos de  $g$  e  $h$ , pelo que o mesmo será feito neste trabalho.

Em conclusão, o perfil em patamar deve ser utilizado quando se pretende efectuar o estudo do comportamento reológico de uma argamassa ao longo do tempo de uma forma contínua. No entanto, para a determinação dos parâmetros reológicos que classificam cada argamassa, ou seja, a tensão de cedência e a viscosidade plástica, é preferível a utilização de medidas com um perfil em escada.

### **3.2. Efeito de adjuvantes no comportamento reológico**

Nesta secção pretende-se avaliar o papel de alguns adjuvantes no comportamento reológico da argamassa em estudo. É ainda discutido o efeito do conteúdo de água de amassadura.

#### **3.2.1. Efeito do agente retentor de água**

Na figura 3.8 pode observar-se a variação do torque com o tempo de ensaio após mistura em argamassas contendo diferentes teores de agente retentor de água (metilo hidroxipropil de celulose – MHPC, aqui abreviadamente designado como éter de celulose).

Os teores de éter de celulose (MHPC) utilizados situam-se dentro da gama recomendada para este tipo de argamassas, ou seja, entre 0.05 e 0.10% relativo ao peso global de sólidos. Verifica-se que os valores de torque são mínimos com adição de 0.08% de MHPC e que com 0.05% MHPC os valores de torque rapidamente igualam os valores medidos para a argamassa base. É de salientar que o teor de MHPC recomendado para esta monomassa é precisamente de 0.08%, sendo utilizado na formulação da argamassa comercial.

A acção deste adjuvante também se faz sentir sobre o fenómeno da destruição estrutural. É patente na figura 3.9 que a presença do MHPC contribui para uma destruição mais eficaz da estrutura, como se comprova pela redução da área de histerese.



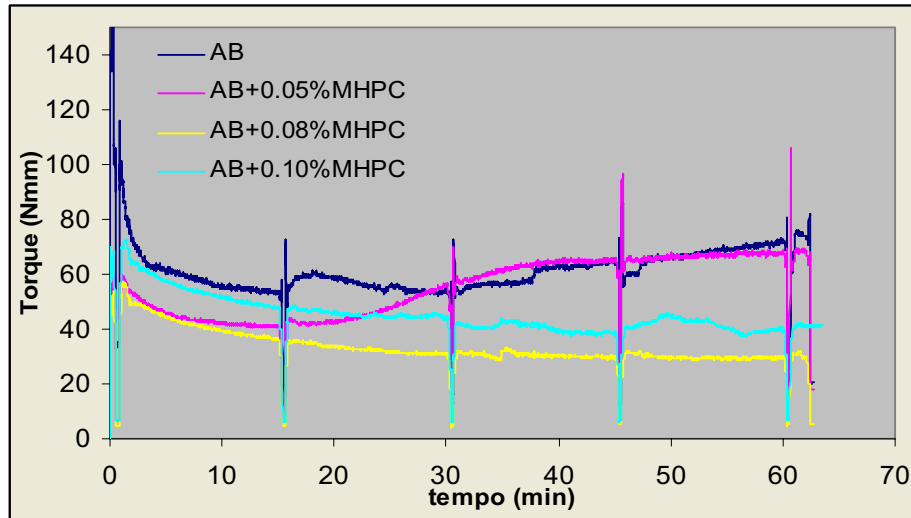


Figura 3.8: Variação de torque com o tempo de ensaio de argamassas com e sem agente retentor de água (21% água de amassadura).

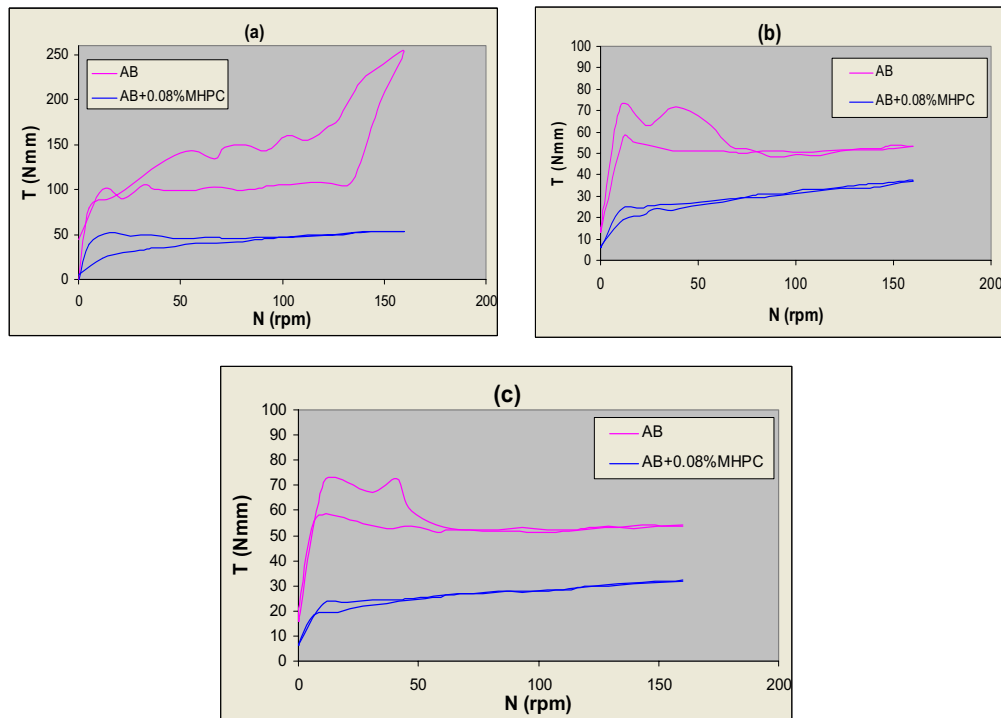


Figura 3.9: Efeito do agente retentor de água (0.08%MHPC) sobre a histerese da curva de fluxo obtida com um perfil em patamar ao fim de 0, 15 e 30 minutos de ensaio, comparativamente à argamassa sem adjuvante (AB).

Estas medidas de torque em função do tempo permitiram também avaliar a variação dos parâmetros reológicos  $g$  e  $h$  ao longo do ensaio (figura 3.10).

Tal como Banfill [24] também verificou nas argamassas estudadas, é possível constatar um decréscimo da viscosidade com o tempo com tendência para estabilizar, devido a uma maior dispersão entre as partículas, enquanto que a tensão de cedência se apresenta estável com uma tendência para aumentar para os tempos mais longos, com a aproximação do início de presa.

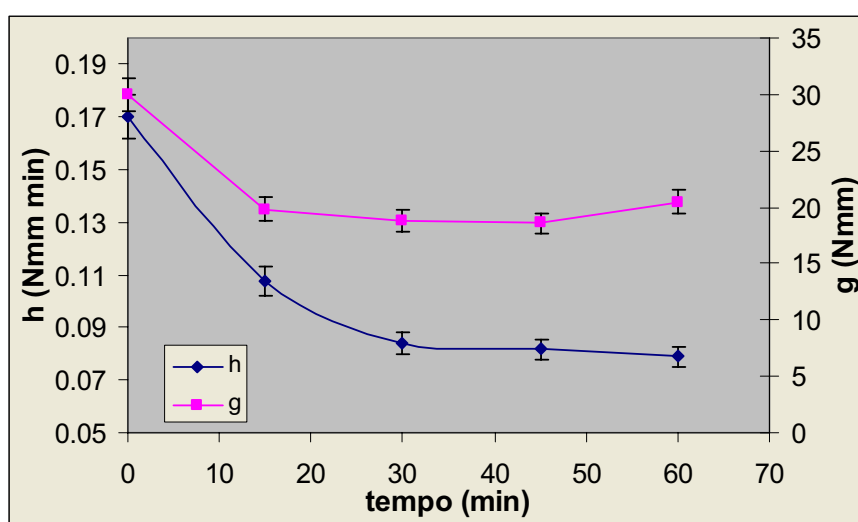


Figura 3.10: Variação de  $g$  e  $h$  em função do tempo de ensaio para uma argamassa com 0.08% de MHPC e 21% de água de amassadura (perfil tipo patamar).

Para o estudo do efeito do teor de agente retentor de água sobre os parâmetros  $g$  e  $h$  utilizou-se o perfil em escada. Neste caso foi também ensaiada uma composição com excesso de MHPC (0.2%) de modo a ter uma visão mais alargada sobre a sua influência nas propriedades de fluxo da argamassa.

Estes resultados, expressos na figura 3.11, confirmam a existência de um mínimo na tensão de cedência para a argamassa com 0.08% de MHPC, enquanto a viscosidade mostra uma tendência para aumentar uma vez que este é um agente espessante. Tal como foi referido no primeiro capítulo, vários autores [16,18,19] observaram este efeito espessante, que se reflecte numa tendência de aumento da viscosidade e tensão de cedência, enquanto outros [19,47] constatararam também a existência de uma concentração mínima de agente retentor que

assegura um mínimo de tensão de cedência. Estas variações têm uma influência directa sobre a trabalhabilidade destas argamassas. Aliás, nesta argamassa específica estes agentes são adicionados com o objectivo principal de aumentar a trabalhabilidade e não propriamente por garantirem um efeito espessante.

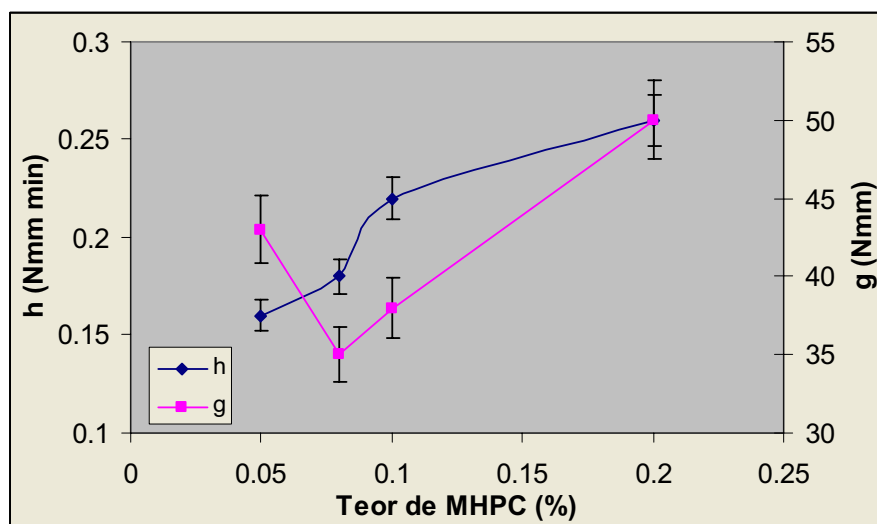


Figura 3.11: Efeito do teor de agente retentor de água nos parâmetros reológicos (g e h) determinados a partir de ensaios efectuados com um perfil tipo escada (argamassas com 19% de água de amassadura).

Avaliou-se também a trabalhabilidade pelo método de espalhamento para confirmar a relação entre esta característica e os parâmetros reológicos. Através da tabela 3.1 pode-se verificar que a trabalhabilidade, medida pelo valor do espalhamento final, após quinze ressaltos, apresenta um máximo para valores entre 0.08 e 0.10% de MHPC diminuindo para o valor mais elevado (0.20% de MHPC) devido ao efeito espessante do adjuvante. Como se referiu no início da secção 3.1, os valores ideais de trabalhabilidade para esta argamassa situam-se entre diâmetros de espalhamento de 140 a 160 mm.

Esta tabela também apresenta os valores de trabalhabilidade para argamassas com outros teores de água de amassadura, cujo efeito será discutido adiante. Apresentam-se ainda os valores do diâmetro de espalhamento inicial, medido imediatamente após a remoção do copo tronco-cónico que contém a amostra. Esta primeira medida está directamente relacionada com a tensão de cedência da

argamassa pois é proporcional à deformação pelo próprio peso [22]. Contudo, verifica-se pela tabela 3.1, que esta avaliação não é suficientemente discriminatória para a caracterização reológica sendo preferível a utilização de um método reométrico, pois este permite a medida independente dos dois parâmetros reológicos, a tensão de cedência e a viscosidade plástica [22,24].

Tabela 3.1: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) da argamassa com o teor de agente retentor de água (MHPC)

Composição	Teor de água (%)	Espalhamento inicial (mm)	Espalhamento final (mm)
AB	19	100	130
AB	21	100	140
AB+0.08%MHPC	17	100	120
AB+0.05%MHPC	19	100	145
AB+0.08%MHPC	19	100	150
AB+0.10%MHPC	19	100	150
AB+0.20%MHPC	19	100	140
AB+0.08%MHPC	21	110	170

Na figura 3.12 pode observar-se, para argamassas com diferentes teores de agente retentor de água, o efeito do teor de água de amassadura. Em primeiro lugar, verifica-se a diminuição evidente da tensão de cedência (ou  $\sigma$ ) e da viscosidade (ou  $\eta$ ) com o aumento do teor de água, também confirmado por diversos autores [24,40]. Em segundo lugar é patente que para teores de água de 21%, já não é possível discriminar com rigor o efeito do teor de adjuvante uma vez que os valores são muito próximos.

O uso de 17% de água parece insuficiente para assegurar uma correcta e reprodutível trabalhabilidade, observando-se desvios no comportamento esperado nomeadamente, quando o teor de adjuvante é baixo (0.05%). De facto, o espalhamento final medido para esta argamassa específica foi de 120 mm, claramente abaixo da zona ideal de trabalhabilidade. Por esta razão, a avaliação

do efeito do teor de agente retentor de água (figura 3.11) foi efectuada com argamassas com 19% de água de amassadura.

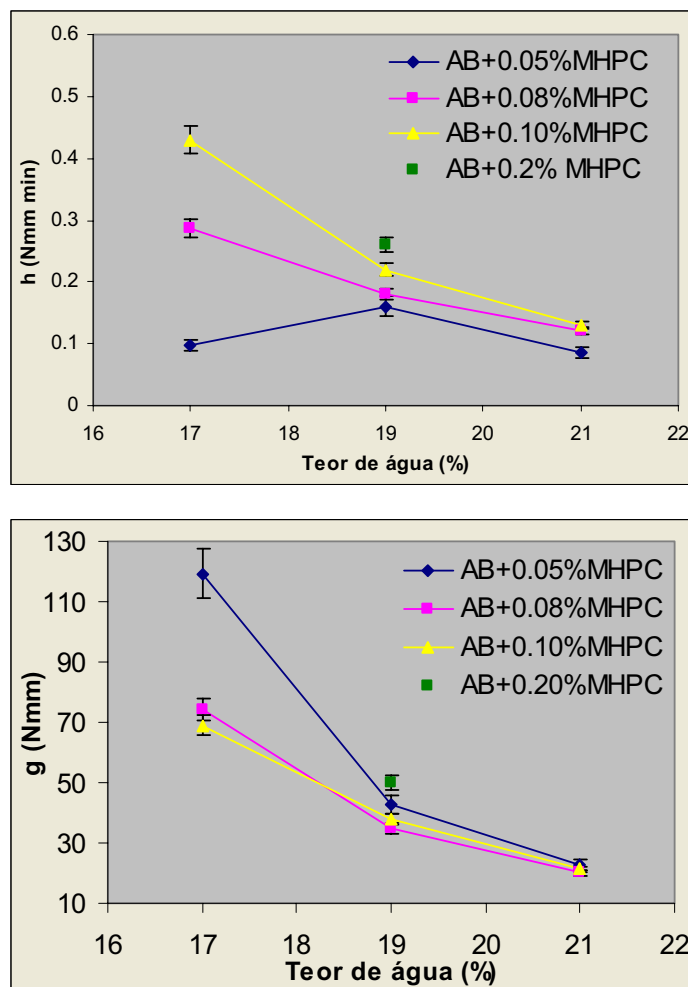


Figura 3.12: Efeito do teor de água de amassadura sobre a reologia das argamassas com agente retentor de água (perfil tipo escada).

Na figura 3.13 compara-se a variação do torque com o tempo para a argamassa sem adjuvantes preparada com 21% de água de amassadura e uma argamassa com 0.08% de MHPC e 19% de água. É possível verificar que os valores de torque para a argamassa com MHPC são inferiores aos medidos para argamassa sem adjuvantes, embora esta contenha um teor mais elevado de água. Pode então afirmar-se, que com pequenas adições de agente retentor de água se pode

reduzir a quantidade de água de amassadura, sem diminuir a trabalhabilidade. Através da tabela 3.1, pode verificar-se que estes valores se encontram dentro do intervalo de trabalhabilidade, ou seja, são de 140 mm para a argamassa base (21% de água) e de 150 mm para a argamassa com 0.08% de MHPC (19% de água). Então é possível estipular, como no ensaio de espalhamento, que o material se encontra dentro da região de trabalhabilidade quando os valores de torque medidos a 160 rpm se situam entre 40 e 60 Nmm.

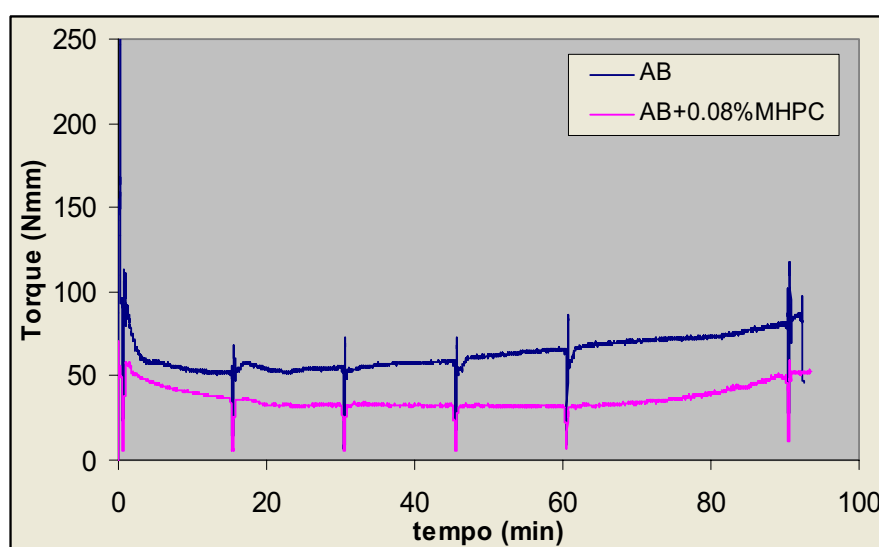


Figura 3.13: Variação do torque com o tempo para a argamassa base preparada com 21% de água de amassadura e para a argamassa com 0.08% MHPC com 19% de água.

### 3.2.2. Efeito do agente introdutor de ar

Na figura 3.14 pode observar-se a variação do torque com o tempo de argamassas preparadas com diferentes teores de agente introdutor de ar (IA). O introdutor de ar utilizado é um produto tensioactivo baseado em sulfil laureato de sódio, adicionado nas proporções de 0.01, 0.025 e 0.05% em peso de argamassa seca. Esta é a gama de valores recomendada para este adjuvante neste tipo de argamassas. É necessário ainda realçar que este adjuvante é normalmente utilizado em conjunto com o agente retentor de água (MHPC), pelo que o efeito do

seu teor (%IA) foi analisado em argamassas contendo já o teor óptimo de éter de celulose (0.08% de MHPC). A tabela 3.2 apresenta as quantidades de ar introduzido nestas argamassas, medidas com o aerómetro, notando-se um aumento progressivo com o aumento de teor de introdutor de ar.

Tabela 3.2: Variação do teor de ar introduzido medido no aerómetro.

Composição	Teor de introdutor de ar (%)	Teor de ar introduzido (%)
AB	0	18
AB+0.08%MHPC	0	21.5
AB+0.08%MHPC +0.01%IA	0.01	26
AB+0.08%MHPC +0.025%IA	0.025	26.5
AB+0.08%MHPC +0.05%IA	0.05	27

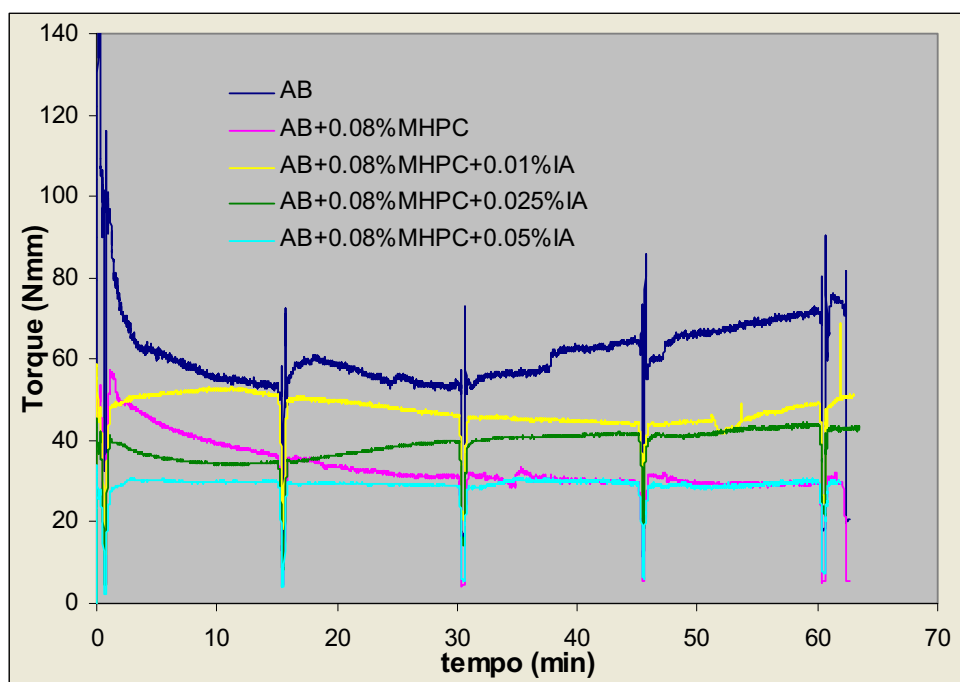


Figura 3.14: Variação de torque com o tempo de ensaio de argamassas com e sem agente introdutor de ar (preparadas com 21% de água de amassadura).

Na figura 3.14, pode-se confirmar que o aumento da quantidade de introdutor de ar conduz a menores valores de torque. A curva relativa à argamassa base apresenta, como se esperava, valores de torque superiores às restantes argamassas com adjuvantes.

Está também representada nesta figura a curva da argamassa com 0.08% de MHPC dado que, como se referiu, as argamassas contendo introdutor de ar possuem também o agente retentor de água na sua formulação. Pode-se observar no início do ensaio uma diminuição do torque com o aumento do teor em introdutor de ar, relativamente ao ensaio da argamassa com 0.08% de MHPC. Estas argamassas com MHPC e IA apresentam uma estabilização mais rápida dos valores de torque devido à presença do introdutor de ar. A argamassa com 0.08% de MHPC continua a apresentar uma diminuição do torque com o tempo, só estabilizando após 30 minutos de ensaio em valores próximos da argamassa com 0.05% de IA. Relativamente ao início do ensaio nota-se que as argamassas com 0.01 e 0.025% de IA possuem valores de torque superiores aos apresentados pela argamassa apenas com MHPC.

Este comportamento pode ser justificado pelo papel duplo, segundo A.S. Coutinho [1], deste adjuvante, que pode funcionar quer como fluido ou como inerte. Isto é, a diminuição progressiva com o teor de IA e a estabilização inicial rápida do torque, são típicas do papel de um fluido enquanto que a estabilidade já referida dos valores de torque ao longo do tempo, ultrapassando mesmo a partir de certo momento os valores de torque da argamassa com 0.08% de MHPC, pode dever-se ao papel típico de inerte, funcionando as bolhas de ar introduzidas como um esqueleto que mantém a estrutura da argamassa.

A figura 3.15 mostra que a adição de introdutor de ar (ex.: 0.025% de IA) contribui para uma rápida destruição estrutural, não alterando a acção desenvolvida pelo agente retentor de água (MHPC), anteriormente estudado, uma vez que as curvas relativas a estes dois adjuvantes são essencialmente semelhantes ao longo do tempo de ensaio, confirmando os resultados patentes na figura 3.14.

A figura 3.16 mostra a variação dos valores de  $g$  e  $h$  da mesma argamassa. É visível o comportamento típico destes parâmetros reológicos, com a diminuição de  $h$  e aumento de  $g$  ao longo do tempo [24].



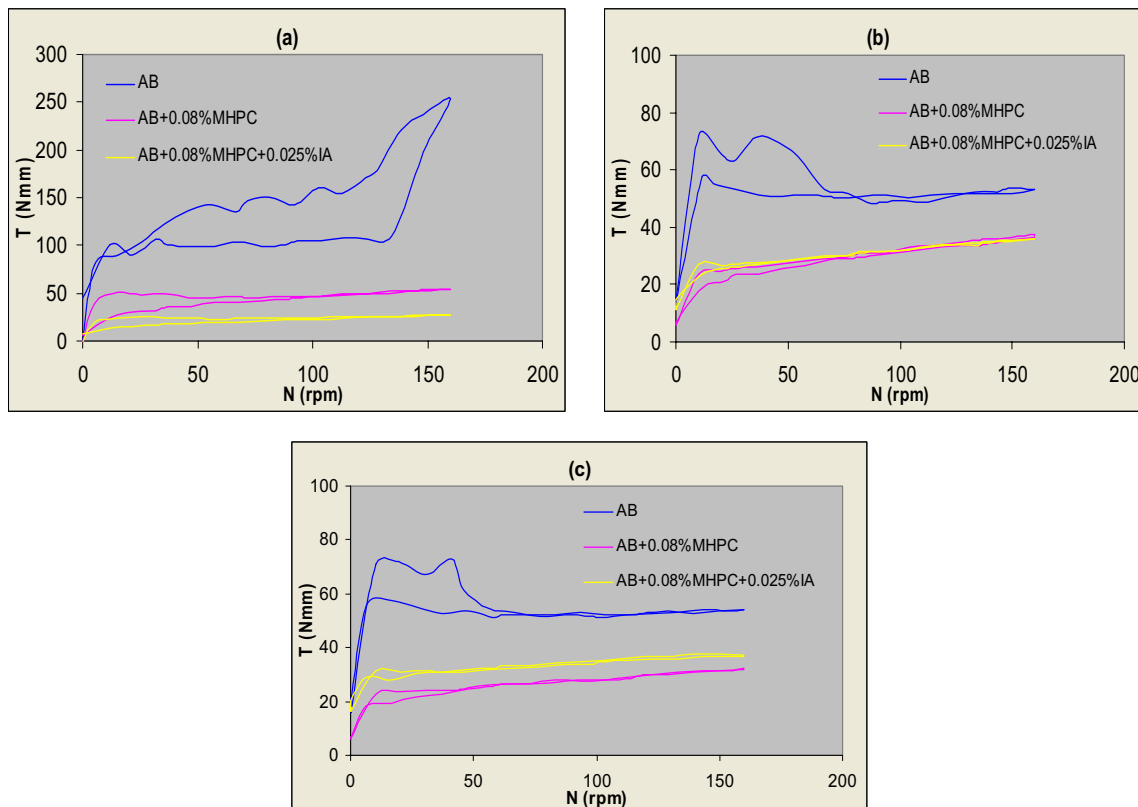


Figura 3.15: Efeito do agente introdutor de ar (0.025%) sobre a histerese da curva de fluxo obtida com um perfil em patamar ao fim de 0, 15 e 30 minutos de ensaio (argamassa preparada com 21% H<sub>2</sub>O).

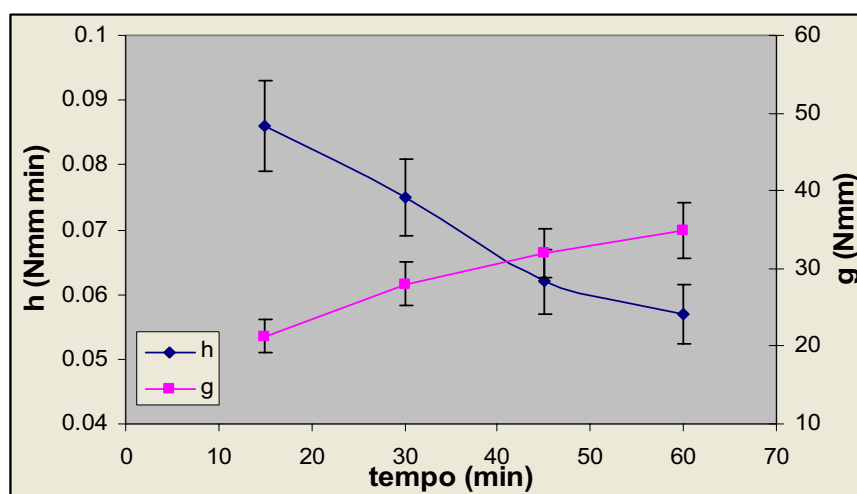


Figura 3.16: Variação de  $g$  e  $h$  em função do tempo de ensaio de uma argamassa com 0.025% de agente introdutor de ar e 0.08%MHPC preparada 21% de água (perfil tipo patamar).

Relativamente à variação dos parâmetros reológicos ( $g$  e  $h$ ) com o teor de agente introdutor de ar na argamassa, podem observar-se duas situações distintas. A figura 3.17(a) apresenta o caso da argamassa contendo na sua formulação base o agente retentor de água (0.08%MPHC) para além do introdutor de ar (IA). A figura 3.17 (b) apresenta a argamassa base apenas com introdutor de ar, neste caso até um teor em excesso de 0.10%.

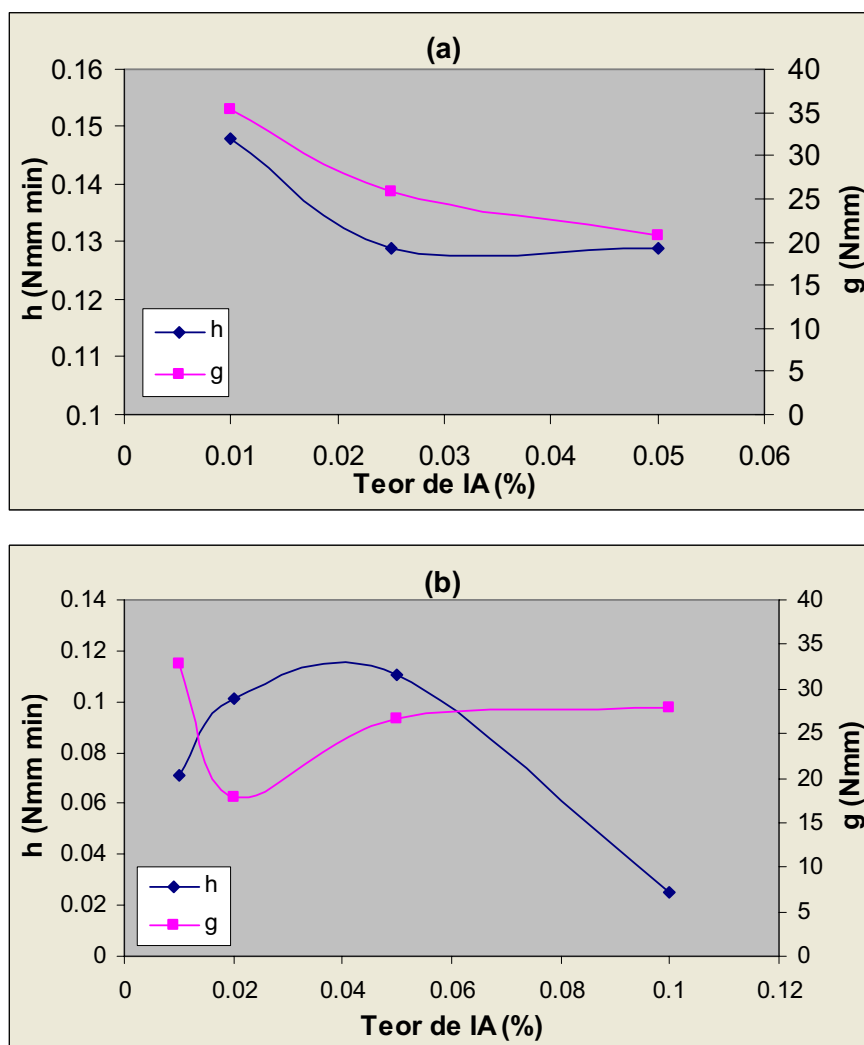


Figura 3.17: Efeito do teor de agente introdutor de ar nos parâmetros reológicos ( $g$  e  $h$ ) determinados a partir de ensaios efectuados com 19% de água de amassadura (perfil tipo escada): (a) argamassa base com 0.08%MPHC e IA; (b) argamassa base só com IA .

Banfill [24,41] afirmou que o aumento do teor de ar introduzido na argamassa provoca uma diminuição da viscosidade enquanto a tensão de cedência não apresenta uma variação significativa. A figura 3.17(a) parece confirmar esta dependência, observando-se uma diminuição da viscosidade e da tensão de cedência mas com tendência desta última para estabilizar. Note-se que esta argamassa já contém o éter de celulose (0.08% de MHPC) o que permite obter, à partida, uma argamassa com boa trabalhabilidade (ver tabela 3.3). Yang et al [46] verificaram um aumento do diâmetro de espalhamento com o aumento do teor de ar introduzido.

Tabela 3.3: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de introdutor de ar.

Composição	Teor de água (%)	Espalhamento inicial (mm)	Espalhamento final (mm)
AB	19	100	130
AB	21	100	140
AB +0.01%IA	19	100	165
AB +0.025%IA	19	100	160
AB +0.05%IA	19	100	155
AB +0.10%IA	19	105	180
AB+0.08%MHPC	19	100	150
AB+0.08%MHPC +0.01%IA	19	100	145
AB+0.08%MHPC +0.025%IA	19	100	150
AB+0.08%MHPC +0.05%IA	19	100	155
AB+0.08%MHPC +0.10%IA	19	110	180

A figura 3.17 (b) apresenta outra situação, mostrando a variação de g e h com o aumento de teor de IA em argamassas sem o agente retentor de água (MHPC). Para valores de IA superiores a 0.05%, a tendência é semelhante, ou seja diminui a viscosidade e estabiliza a tensão de cedência. No entanto, para valores mais baixos de IA o comportamento observado é diferente, notando-se um valor mínimo na tensão de cedência. Note-se que este é o teor recomendado para esta monomassa. Em termos de viscosidade, regista-se um ligeiro aumento para

reduzidos teores de introdutor de ar ( $<0.05\%IA$ ) confirmado pela variação semelhante da trabalhabilidade, patente na tabela 3.3, para argamassas com IA mas sem MHPC. Para valores superiores a  $0.05\%$  a viscosidade desce significativamente enquanto o espalhamento aumenta ( $180\text{ mm}$ ). Este comportamento pode estar relacionado com o papel duplo do agente introdutor de ar, actuando como inerte quando usado em reduzida quantidade e contribuindo para a diminuição da trabalhabilidade e aumento de viscosidade, ou actuando como fluido para teores superiores originando a descida acentuada da viscosidade e consequente perda de consistência. Existem ainda outras razões para limitar o teor de introdutor de ar, uma vez que, quantidades excessivas deste adjuvante contribuem para uma diminuição das propriedades mecânicas da monomassa endurecida.

A diferença de comportamento entre as argamassas com e sem MHPC (figura 3.17(a) e (b)) à medida que se aumenta o teor de IA pode ser devida a um efeito concorrencial entre os dois adjuvantes. De facto alguns autores [18,20] referem a necessidade de usar adjuvantes fluidificantes (introdutores de ar e superplastificantes) em conjunto com agentes espessantes, tal como retentores de água (MHPC). A diferença citada pode também ser observada na figura 3.18, que mostra a variação da trabalhabilidade com o teor de IA com e sem a presença de MHPC. Comparando as duas argamassas verifica-se que o MHPC actua como espessante para teores de IA mais baixos ( $<0.05\%$ ).

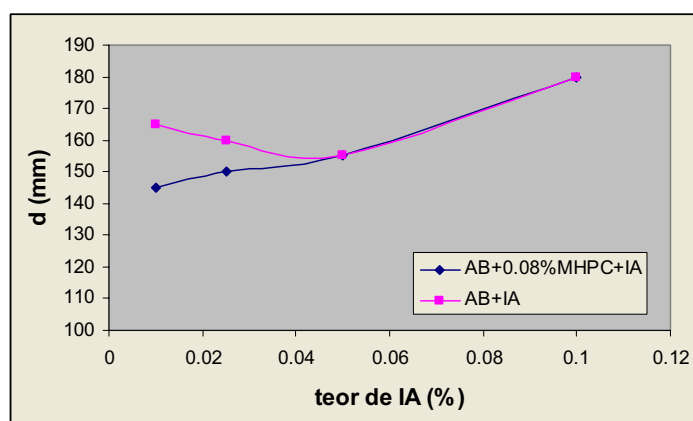


Figura 3.18: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de introdutor de ar de argamassas com e sem agente retentor de água ( $0.08\%$  de MHPC). Ambas contêm  $19\%$  de água de amassadura.

A figura 3.19 apresenta o efeito do teor de água de amassadura e do teor de introdutor de ar no comportamento de argamassas contendo quantidade óptima de éter de celulose (0.08% de MHPC). Em termos gerais, é evidente a diminuição da tensão de cedência (ou g) e da viscosidade (ou h) com o aumento do teor de água de amassadura.

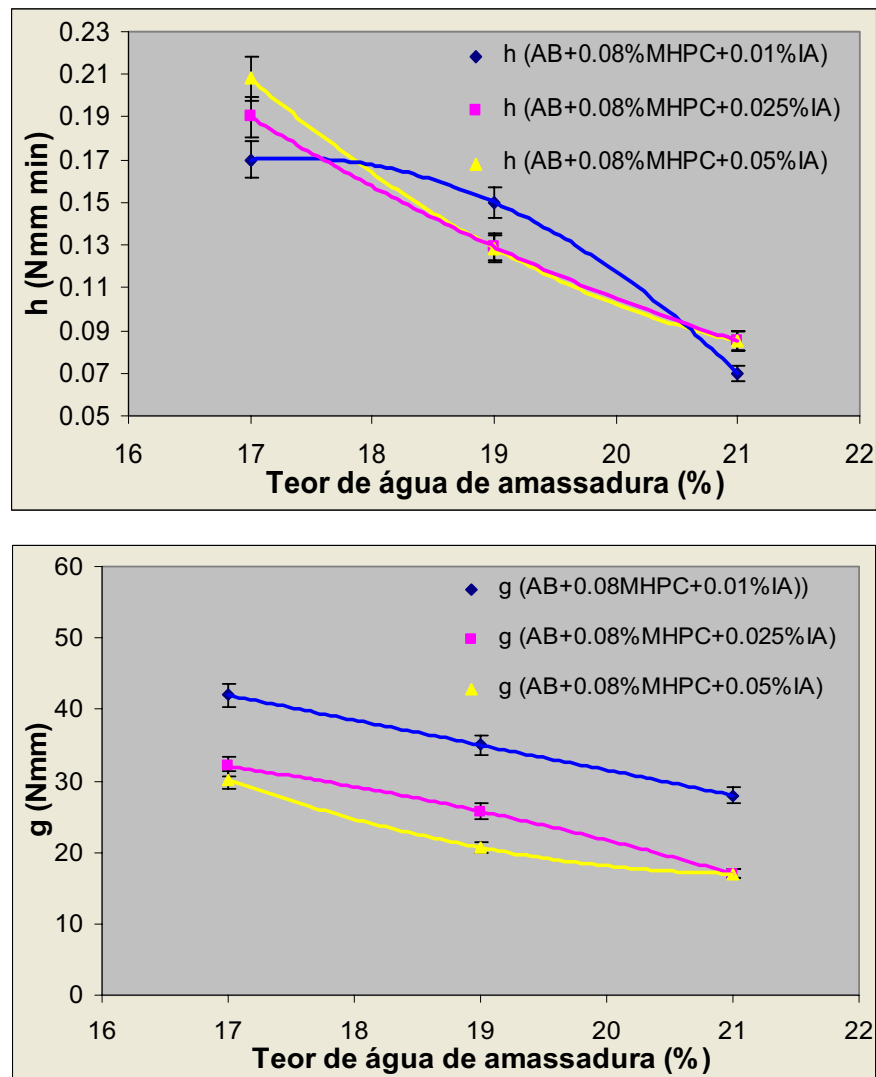


Figura 3.19: Efeito do teor de água de amassadura e da quantidade de introdutor de ar sobre a reologia das argamassas (perfil em escada).

Relativamente à viscosidade, a variação observada para as argamassas com 19% de água de amassadura reflecte a situação expressa na figura 3.17(a).

Contudo, com 17% de água nota-se uma inversão de comportamento, ou seja, ocorre aumento de viscosidade (coeficiente h) com o aumento de teor de IA. Esta tendência é confirmada pelos ensaios de espalhamento (ver tabela 3.4) efectuados em argamassas contendo introdutor de ar e MHPC, preparadas com 17% de água de amassadura. Neste caso os valores de trabalhabilidade situam-se no limite inferior, verificando-se um comportamento idêntico ao das argamassas contendo reduzido teor de IA (<0.05%) ausência de MHPC e com 19% de água de amassadura. As argamassas preparadas com 21% de água de amassadura mostram comportamento oposto, ou seja, encontram-se acima do limite superior de trabalhabilidade (>160mm), o que torna os valores de viscosidade muito baixos e semelhantes.

Tabela 3.4: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de introdutor de ar.

Composição	Teor de água (%)	Espalhamento inicial (mm)	Espalhamento final (mm)
AB +0.08%MHPC+0.01%IA	17	100	140
AB +0.08%MHPC +0.025%IA	17	100	140
AB +0.08%MHPC +0.05%IA	17	100	135

Na figura 3.20 compara-se a variação do torque com o tempo da argamassa base (sem adjuvantes) preparada com 21% de água de amassadura e outra argamassa com 0.08% de MHPC e 0.025% de introdutor de ar, mas preparada com 19% de água de amassadura. É possível verificar que os valores de torque para a argamassa com adjuvantes são inferiores aos medidos para argamassa base, embora esta contenha um teor de água superior. Então, pode-se afirmar que com a utilização conjunta dos dois adjuvantes se mantém o efeito secundário de redução da água de amassadura, sem diminuir a trabalhabilidade da argamassa. Estes valores (tabela 3.3) encontram-se dentro do intervalo de trabalhabilidade, ou seja, são de 140 mm para a argamassa base (21% de água) e de 150 mm para a argamassa com 0.08% de MHPC e 0.025% de IA (19% de água). Tal como no caso do adjuvante retentor de água (MHPC), é possível

estipular, como no ensaio de espalhamento, uma gama de valores de torque (entre 40 e 60 Nmm, a 160 rpm) onde o material se encontra dentro da região de trabalhabilidade.

Pode-se ainda observar na figura 3.20 que, na argamassa base, os valores de torque tendem a aumentar para tempos mais longos enquanto que a argamassa com adjuvantes apresenta uma estabilidade superior, o que pode indicar que existe também um efeito de retardamento de presa neste último caso.

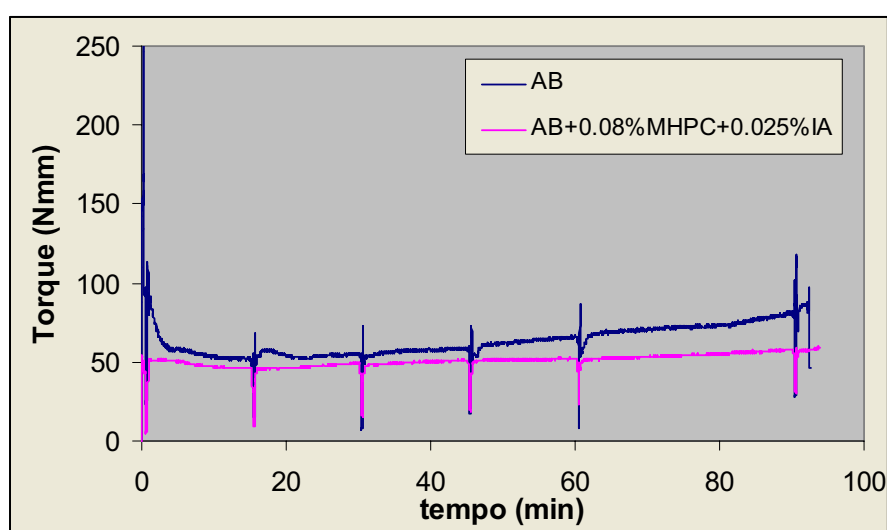


Figura 3.20: Variação do torque com o tempo de uma argamassa base preparada com 21% de água de amassadura e de outra argamassa contendo 0.025% IA e 19% de água.

### 3.2.3. Efeito do agente redutor de água ou superplastificante

Na figura 3.21 pode observar-se a variação do torque com o tempo de argamassas contendo diferentes teores de agente redutor de água. O superplastificante utilizado foi um produto tensoactivo baseado em melamina sulfonatada, adicionado nas proporções de 0.05 e 0.10% em peso de argamassa seca. Esta é a gama de valores típica para este adjuvante. Pode-se observar que o aumento de superplastificante (SP) não altera significativamente os valores de torque. A curva relativa à argamassa base apresenta valores de torque superiores

às restantes argamassas com adjuvantes.

Em argamassas com 0.08% de MHPC observa-se, no início do ensaio, uma diminuição do torque quando se usa agente redutor de água. As argamassas contendo MHPC e SP estabilizam mais rapidamente, parecendo ser este o efeito mais relevante associado ao SP. A argamassa com 0.08% de MHPC continua a apresentar uma diminuição do torque com o tempo até 30 minutos de ensaio enquanto as argamassas com SP estabilizam ao fim de 15 minutos. Após 30 minutos as curvas relativas às argamassas com e sem redutor de água sobrepõem-se. Isto pode ser justificado com o facto de os superplastificantes perderem a sua acção tipicamente ao fim deste período.

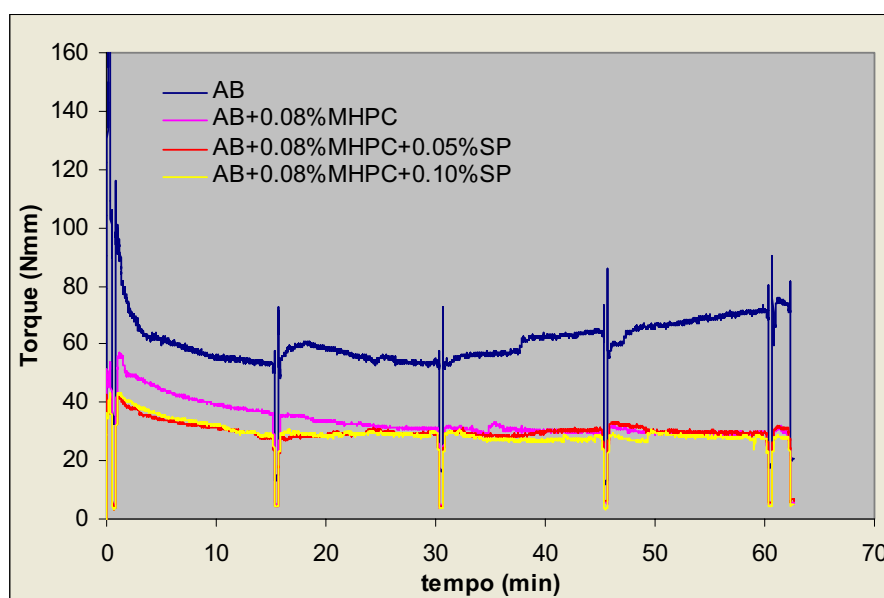


Figura 3.21: Variação de torque com o tempo de ensaio de argamassas com diferentes teores de agente redutor de água (SP) preparadas com 21% de água e 0.08% MHPC.

A figura 3.22 mostra que a adição de superplastificante (0.10% SP) contribui para uma rápida destruição estrutural, ligeiramente mais eficaz que a desenvolvida pelo agente retentor de água (MHPC). Repare-se que as curvas de argamassas contendo SP situam-se abaixo da curva da argamassa contendo apenas MHPC. A área de histerese é também ligeiramente menor.

A figura 3.23 mostra a variação dos valores de g e h destas argamassas. É visível



a variação típica destes parâmetros reológicos com tendência para a diminuição de  $h$  e aumento de  $g$  ao longo do tempo [24].

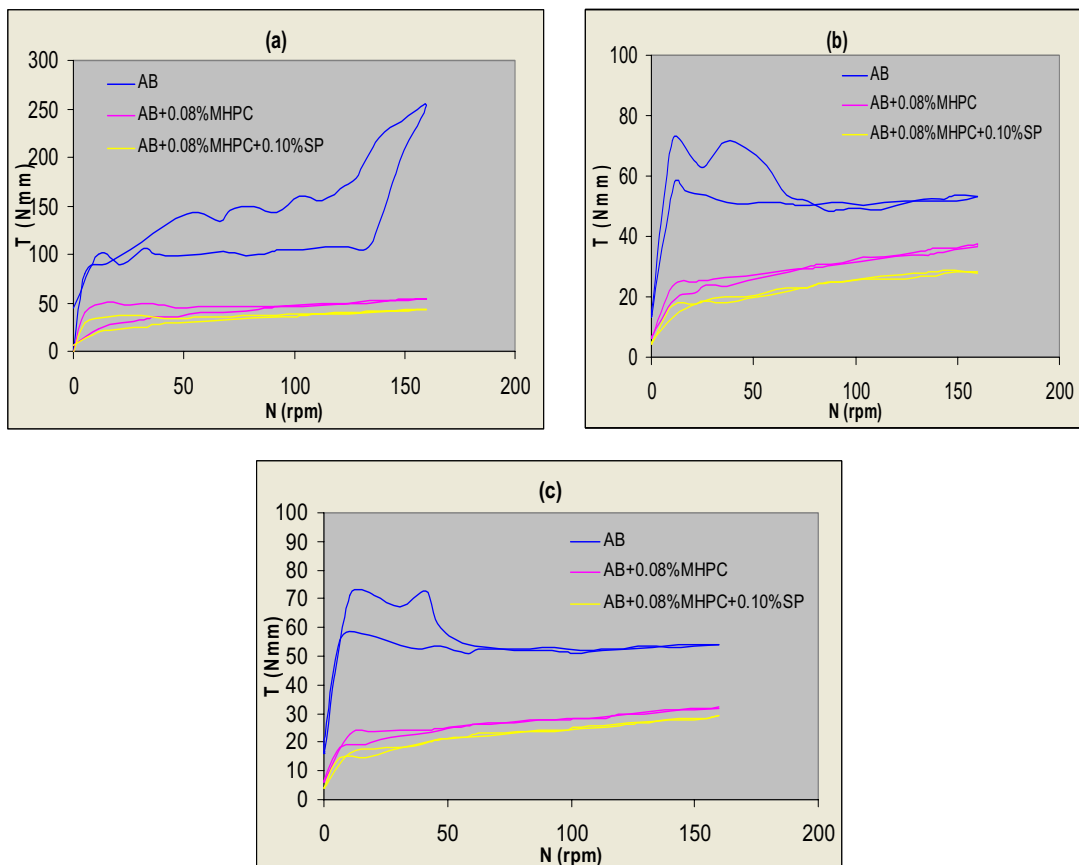


Figura 3.22: Efeito do agente redutor de água (0.10%) sobre a histerese da curva de fluxo (perfil tipo patamar aos 0, 15 e 30 minutos de ensaio) de argamassas preparadas com 21% de água de amassadura e contendo 0.08% MHPC.

A figura 3.24 apresenta a variação dos parâmetros reológicos ( $g$  e  $h$ ) com o teor de agente redutor de água na argamassa. Esta figura mostra também os resultados para um teor excessivo de superplastificante (0.50%SP). Como agente fluidificante que é, provoca uma forte redução na viscosidade e tensão de cedência da argamassa.

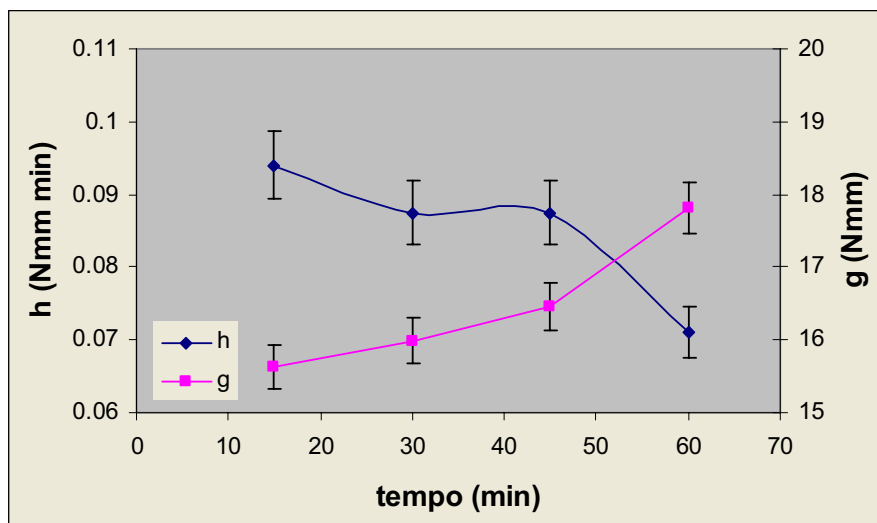


Figura 3.23: Variação de g e h em função do tempo de ensaio de uma argamassa contendo 0.10% de agente redutor de água e 0.08% MHPC e preparada com 21% de água de amassadura (perfil em patamar).

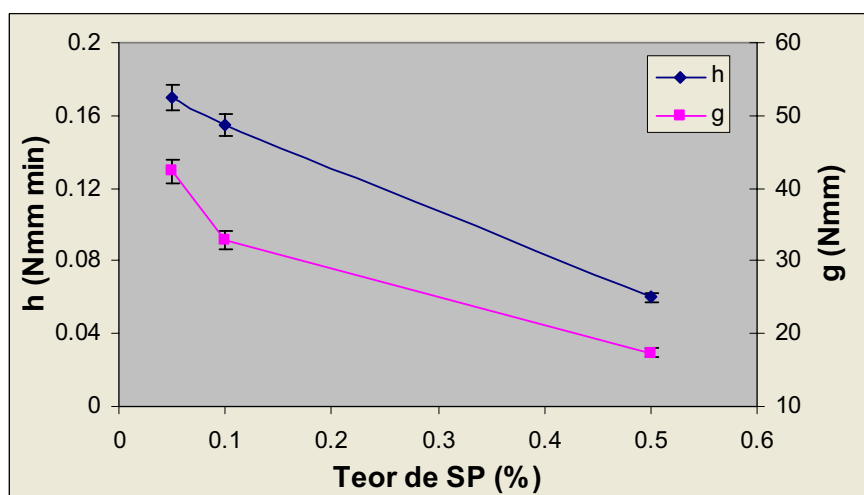


Figura 3.24: Efeito do teor de agente redutor de água (SP) nos parâmetros reológicos (perfil em escada) de uma argamassa preparada sem MHPC e com 19% de água de amassadura.

Estes resultados são também confirmados pelos valores de trabalhabilidade medidos, pelo do método de espalhamento, (ver tabela 3.5). De facto, assiste-se

a um aumento gradual do diâmetro de espalhamento com o aumento do teor de superplastificante atingindo-se valores fora do limite superior de trabalhabilidade. A forte diminuição do valor de tensão de cedência (coeficiente g) reflecte-se num aumento do diâmetro de espalhamento inicial, que está relacionado com a deformação sob a acção do próprio peso.

Nesta tabela apresentam-se também os valores relativos às argamassas com 0.05% e 0.10% de superplastificante contendo 0.08% de MHPC. Todas estas argamassas foram preparadas com 19% de água de amassadura. A pequena diferença observável na figura 3.21 até aos 30 minutos de tempo de ensaio, entre a argamassa só com 0.08% MHPC e as argamassas com 0.08% de MHPC mais 0.05 e 0.10% de SP, não é suficiente para aparecer discriminada nestes resultados de espalhamento. Todas estas argamassas apresentam um espalhamento final de 150 mm. Este facto confirma a vantagem da avaliação reológica para além da quantificação dos parâmetros reológicos, pois apresenta uma maior sensibilidade às suas variações. A diferença de comportamento entre as argamassas contendo MHPC e SP e as que contém apenas SP, deve-se provavelmente ao efeito concorrencial simultâneo do agente espessante (MHPC) e do fluidificante (SP) quando adicionados juntos, equilibrando as características reológicas das misturas.

Tabela 3.5: Variação da trabalhabilidade (espalhamento) com o teor de agente redutor de água ou superplastificante (SP).

Composição	Teor de água (%)	Espalhamento inicial (mm)	Espalhamento final (mm)
AB	19	100	130
AB+0.05%SP	19	100	150
AB+0.10%SP	19	105	160
AB+0.50%SP	19	110	170
AB+0.08%MHPC	19	100	150
AB+0.08%MHPC +0.05%SP	19	100	150
AB+0.08%MHPC +0.10%SP	19	100	150

Na figura 3.25 pode-se observar o efeito do teor de água de amassadura para uma argamassa com superplastificante (0.10%SP) contendo também 0.08% de MHPC. Os resultados apresentados foram retirados de ensaios com o perfil tipo patamar, ao contrário dos casos anteriores, uma vez que o perfil em escada foi apenas utilizado para argamassas com este adjuvante (SP) preparadas com 19% de água de amassadura. No entanto, verifica-se de novo a diminuição da tensão de cedência (ou g) e da viscosidade (ou h) com o aumento do teor de água de amassadura, tal como verificado para a situação equivalente com os outros adjuvantes estudados e patente nas figuras 3.12 e 3.19

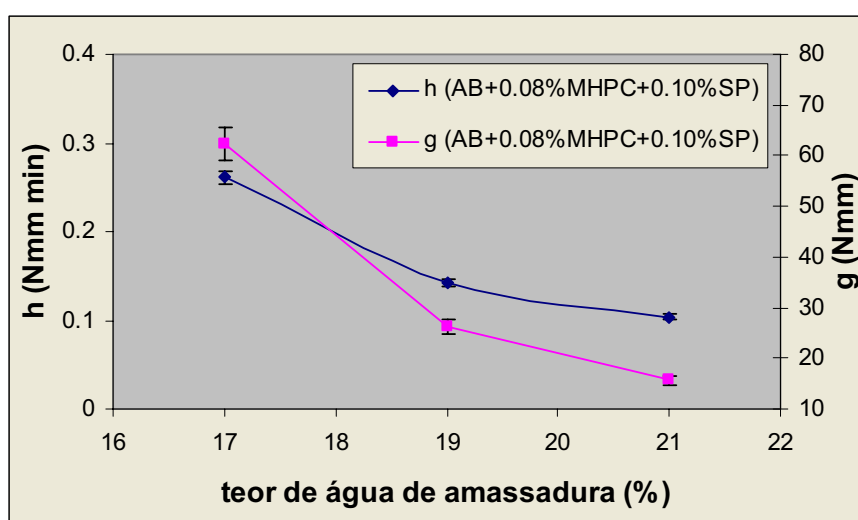


Figura 3.25: Efeito do teor de água de amassadura sobre a reologia de argamassas com 0.10% de agente redutor de água e 08% de MHPC (perfil tipo patamar; após 15 minutos de ensaio).

Na figura 3.26 compara-se a variação do torque com o tempo de uma argamassa base (sem adjuvantes) preparada com 21% de água de amassadura com a de uma argamassa contendo 0.08% de MHPC e 0.10% de agente redutor de água mas preparada com 19% de água de amassadura. É possível verificar que os valores de torque da argamassa com adjuvantes são inferiores aos medidos para a argamassa base, embora esta contenha um maior teor de água. Então, pode-se afirmar que se mantém o efeito de redução da água de amassadura, sem diminuir a trabalhabilidade da argamassa, o que é favorável em termos de características

finais do material. Os valores encontram-se dentro do intervalo de trabalhabilidade, ou seja, são de 140 mm para a argamassa base (21% de água) e de 150 mm para a argamassa com 0.08% de MHPC e 0.10% de SP (19% de água). Tal como nos casos dos adjuvantes anteriores (MHPC e IA), é possível estipular, como no ensaio de espalhamento, uma gama de valores de torque (40-60 Nmm a 160 rpm) onde o material se encontra dentro da região de trabalhabilidade adequada.

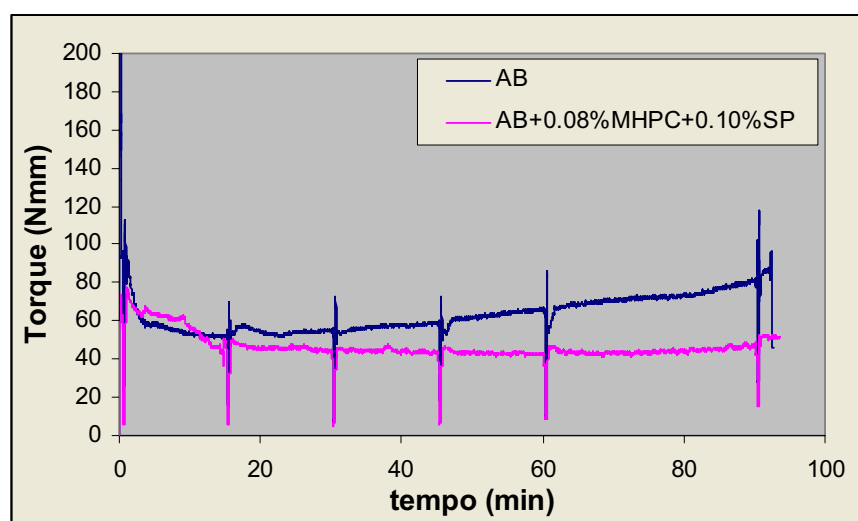


Figura 3.26: Variação do torque com o tempo de uma argamassa base contendo 21% de água de amassadura e de uma argamassa com 0.10% de Spe 0.08% MHPC e com 19% de água.

Pode-se ainda observar na figura 3.26, e à semelhança da descrição do efeito do agente introdutor de ar discutido anteriormente, que a argamassa base apresenta uma tendência para a subida dos valores de torque para os tempos mais longos de ensaio, enquanto que a argamassa contendo as proporções correctas de agentes de retenção e redução de água apresenta comportamento estável, o que pode indicar que existe também um efeito de retardamento de presa.



#### **4. Conclusões**

Este trabalho teve como objectivo o estudo do comportamento reológico de argamassas, procurando, antes de mais, definir um procedimento de análise fiável e sensível e, depois, avaliar o efeito de alguns adjuvantes típicos sobre o comportamento reológico de uma monomassa. A avaliação reológica foi sempre acompanhada da medição da trabalhabilidade, pelo método de espalhamento, procurando-se estabelecer uma relação entre o novo método e a forma de avaliação tradicional do comportamento no estado fresco das argamassas. Neste âmbito, os resultados obtidos de acordo com o procedimento adoptado permitiram obter as seguintes conclusões:

Relativamente ao comportamento reológico, avaliaram-se as condições ideais para a utilização de um novo reómetro específico para argamassas (Viskomat). Partindo de um perfil a velocidade constante (perfil em patamar) variou-se a velocidade de ensaio. Conclui-se que a velocidade mais elevada (160 rpm) permitiu destruir rapidamente a estrutura do material, estabilizando os valores de torque. O tempo de ensaio é uma variável livre no sentido em que é possível medir o comportamento reológico quase até ao início da presa. Várias medidas efectuadas sobre amostras com a mesma formulação permitiram concluir que este método apresenta uma elevada reprodutibilidade.

Para além do comportamento reológico ao longo do tempo, foi possível observar através do perfil em patamar o fenómeno de destruição estrutural, patente nos cimentos e argamassas, pela evolução da área de histerese nas curvas de fluxo (torque em função da velocidade de corte). Estas curvas permitiram também concluir que o comportamento ao fluxo da argamassa em estudo se adequava ao modelo de Bingham, calculando-se a tensão de cedência e a viscosidade plástica da argamassa. No cálculo destes parâmetros foi possível concluir que é mais fiável utilizar as curvas de fluxo em regime de velocidade descendente. Ainda assim, constatou-se que para valores baixos de velocidade, à medida que esta se

aproxima de zero, existem desvios à linearidade na relação de Bingham, que se devem ao facto da taxa de reconstrução estrutural dominar a taxa de destruição causada pela agitação.

Obtém-se também uma melhor avaliação dos parâmetros reológicos quando as curvas de fluxo se registam num perfil tipo escada (em vez de patamar), uma vez que se mantém a amostra (a cada velocidade) o tempo necessário para se atingir um valor estacionário de torque. No fundo, esta metodologia assegura a obtenção de valores em equilíbrio e não instantâneos como no caso do perfil em patamar. Por isso, foi o privilegiado na avaliação do efeito dos diferentes adjuvantes sobre os parâmetros reológicos.

Sobre o efeito do agente retentor de água (éter de celulose - MHPC) pode-se concluir, em primeiro lugar, que existe um teor (0.08% de MHPC) que assegura condições óptimas de trabalhabilidade relativamente à argamassa base (sem adjuvantes). Pode-se observar, para esta argamassa, um mínimo no valor de tensão de cedência para valores de viscosidade não demasiadamente elevados, o que comprova o carácter espessante deste adjuvante. É conclusiva a promoção da rápida destruição estrutural, visível pela redução acentuada na área de histerese das curvas de fluxo. Por outro lado, as curvas de torque em função do tempo de ensaio, denotam menores variações e superior estabilidade com o teor de MHPC.

A variação do teor de água de amassadura em argamassas com diferentes teores de agente retentor de água, permitem retirar duas conclusões: (i) em primeiro lugar, verifica-se um efeito secundário deste adjuvante de redução da quantidade de água de amassadura sem degradar a trabalhabilidade; (ii) em segundo lugar, verifica-se que, em argamassas com teores de água cujos valores da trabalhabilidade se afastem do intervalo adequado o efeito do adjuvante se anula (caso de 21% de água, em que o efeito provocado pela quantidade de água de amassadura em excesso se sobrepõe ao efeito do adjuvante) ou então existem desvios no comportamento esperado (material com 17% de água).



O efeito do agente introdutor de ar sobre o comportamento reológico, foi avaliado em argamassas contendo ou não agente retentor de água, uma vez que se utiliza frequentemente os dois adjuvantes em simultâneo. A evolução do torque com o tempo (perfil em patamar) permitiu concluir que a introdução deste adjuvante promove uma estabilização rápida, não alterando a destruição estrutural promovida pelo agente retentor de água quando usados em conjunto.

A avaliação dos parâmetros reológicos ( $g$  e  $h$ ) foi efectuada também em argamassas com e sem MHPC. Verificou-se uma tendência para ocorrer diminuição da viscosidade e da tensão de cedência com o aumento do adjuvante introdutor de ar (IA). Na argamassa apenas com IA (sem MHPC) verificou-se uma tendência de estabilização da tensão de cedência notando-se, contudo, a existência de valor mínimo precisamente para o teor de IA recomendado industrialmente (0.025%). A evolução da viscosidade não é monótona, uma vez que antes da diminuição evidente com o aumento do teor em IA ocorre um ligeiro aumento com as primeiras adições deste adjuvante. Este comportamento, também testemunhado pelas medidas de espalhamento, foi relacionado com o papel duplo que os agentes introdutores de ar podem desempenhar, actuando preferencialmente como fluido ( $IA \geq 0.05\%$ ) ou como inerte ( $IA < 0.05\%$ ).

A variação do teor de água de amassadura nas argamassas, contendo MHPC e IA, revelou-se outro factor muito importante sendo óptimo o comportamento observado com 19%. Argamassas preparadas com 17% e 21% possuem trabalhabilidade desajustada relativamente ao intervalo aceitável.

Tal como anteriormente, observa-se o efeito de redução de água de amassadura sem perda de trabalhabilidade, comparativamente à argamassa sem adjuvantes. Verifica-se também, através da variação do torque com o tempo, que pode existir um efeito de retardamento de presa.

A adição de agente superplastificante, no intervalo de teores recomendados, não provoca grande alteração na evolução dos valores de torque com o tempo relativamente à argamassa com MHPC. Apresenta, contudo, uma estabilização muito rápida dos valores de torque e uma redução mais efectiva da área da histerese das curvas de fluxo o que constitui um indicador do contributo deste

agente para a destruição estrutural nestas argamassas. Em relação aos parâmetros reológicos, observa-se um efeito claro fluidificante, com redução dos valores da tensão de cedência (coeficiente  $g$ ) e viscosidade (coeficiente  $h$ ) à medida que se aumenta a sua quantidade. Este facto é também confirmado pelo aumento sistemático do diâmetro de espalhamento. Pode-se concluir que a diferença de comportamento entre as argamassas com superplastificante, contendo ou não MHPC, se deve ao efeito concorrencial entre os dois adjuvantes uma vez que um actua como fluidificante enquanto o outro é um agente espessante.

O aumento do teor de água de amassadura originou variações lógicas de diminuição de  $g$  e  $h$ , já verificado anteriormente. Relativamente à argamassa base, a introdução de superplastificante cumpre claramente o seu papel como agente redutor de água, apresentando também o efeito secundário de retardamento de presa.

A partir das medidas reométricas de torque em função do tempo para os três adjuvantes estudados, é possível estabelecer a relação que se pretendia atingir entre estas medidas e o ensaio de espalhamento, uma vez que se verificou que o material se encontra dentro da região de trabalhabilidade quando os valores de torque medidos a 160 rpm se situam entre 40 e 60 Nmm.

Resume-se ainda os efeitos dos diversos componentes sobre o comportamento reológico da argamassa estudada numa representação esquemática (figura 4.1) dos parâmetros reológicos  $g$  e  $h$ . Enquanto o aumento do teor de água de amassadura, do agente introdutor de ar e do superplastificante tem um claro efeito fluidificante sobre a argamassa, o aumento de agente retentor de água (MHPC) apresenta, primeiro, um efeito fluidificante devida à redução inicial da tensão de cedência ( $g$ ), para depois evidenciar o efeito espessante já esperado para este tipo de adjuvante. É de salientar que o teor correspondente a este mínimo de tensão de cedência é o escolhido para a quantidade deste adjuvante a adicionar a esta monomassa.

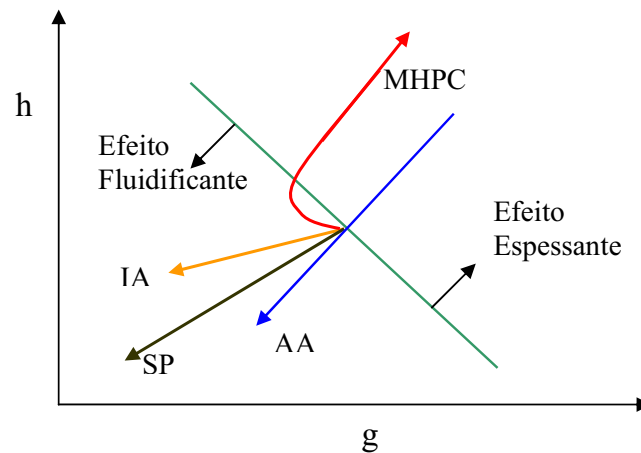


Figura 4.1: Resumo esquemático do efeito do agente retentor de água (MHPC), do introdutor de ar (IA), do superplastificante (SP) e da água de amassadura (AA) sobre o comportamento reológico da argamassa estudada. As setas indicam o aumento dos teores dos referidos componentes da argamassa

Em conclusão, foi possível estabelecer um procedimento adequado para a caracterização reológica de argamassas e, em particular, para a avaliação do efeito que qualquer tipo de adjuvante ou outra modificação na formulação de argamassas pode exercer sobre o comportamento no estado fresco destes materiais.

Este trabalho abre perspectivas interessantes uma vez que possibilita o estudo e desenvolvimento de argamassas, de forma mais controlada, permitindo compreender com maior detalhe o efeito dos seus componentes. Em termos de trabalho futuro julga-se importante estudar, a correlação entre o comportamento reológico e outras características relevantes no estado fresco e endurecido das argamassas. Em particular, será interessante prosseguir os estudos em argamassas para diferentes aplicações (betonilhas, rebocos, revestimento) ou mesmo com diferentes ligantes (cal aérea ou hidráulica).



## 5. Referências bibliográficas

1. A.S. Coutinho, Fabrico e Propriedades do Betão, Volume I, Ed. Laboratório Nacional Engenharia Civil, Lisboa, (1997).
2. J.F. Young, S. Mindess, R.J. Gray, A. Bentur, The Science and Technology of Civil Engineering Materials, Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey, (1998).
3. A M. Neville, Properties of Concrete, Ed. Pitman Publishing, London, (1975)
4. P.C. Hewlett, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, (2001).
5. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6ª edition, (2003).
6. H.F.W. Taylor, The Chemistry of Cements, Volume I, Ed. Academic Press Inc., London, (1972).
7. W.F. Smith, Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, Ed. McGraw-Hill Inc.,Lisboa, (1996).
8. M.R. Smith, L. Collins, Aggregates, sand, gravel and aggregates for construction purpose, Geological Society, ISBN: 0-903317-8903, (1993).
9. J. Mascarenhas, Sistemas de construção II- paredes, Ed. livros horizonte, Lisboa, (2003).
10. A.S. Coutinho, Fabrico e Propriedades do Betão, Volume II, Ed. Laboratório Nacional Engenharia Civil, Lisboa, (1997).
11. P.C. Hiemenz, Principles of colloid and surface chemistry, Ed. Marcel Dekker Inc., (1977).
12. A.T. Fonseca, Tecnologia do Processamento Cerâmico, Ed. Universidade Aberta, Lisboa, (2000).
13. R Rixom, N. Mailvaganam, Chemical Admixtures for Concrete, Ed. E&FN Spon, London, (1999)
14. S. Chatterji, Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air –entraining agents, Cement and Concrete Composites, 25, 759-765, (2003).
15. D.S. Zhang, Air entrainment in fresh concrete with PFA, *Cement and Concrete Composites*, 18,409-416, (1996).

16. D.A. Silva, H.R. Roman, Caracterização microestrutural de pastas de cimentos aditivadas com polímeros HEC e EVA, *Ambiente Construido*, 2(2), 31-46, (2002).
17. DIN 18555: Testing of mortars with mineral binders, part 7: Determination of water retention value, (November 1987).
18. K.H. Khayat , Viscosity-Enhancing admixtures for cement-based materials- An Overview, *Cement and Concrete Composites*, 20, 171-188, (1998).
19. M. Lachemi, K.M.A. Hossain, P.C. Nkinamubanzi, N. Bouzoubaâ, Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement past, *Cement and Concrete Research*, 34, 185-193, (2004).
20. K.H. Khayat, M.S. Coric, I.F. Liotta, Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concretes, *ACI Materials Journal*, 99 (3), 234-241, (2002).
21. N.B. Eden, J.E. Bailey, Effect of polymer modification on the mechanical properties of calcium silicate and calcium aluminate cements, *Proc. International Congress of the Chemistry of Cement*, 163-169, (1986).
22. C.F. Ferraris, Measurement of rheological properties of cement past: a new approach, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104, 461-478, (1999).
23. P.G. Banfill, The rheology of fresh cement and concrete – a review, *Proc. of 11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, 50-62, (2003).
24. P.G. Banfill, Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials, *Construction and Building materials*, 8, 43-50, (1994).
25. P.G. Banfill, Structure and rheology of cement based systems, *Proc. Materials Research Society Symposium*, 289, 149-160, (1993).
26. P.G. Banfill, D.R. Kitching, Use of a controlled stress rheometer to study the yield value of oilwell cement slurries, in *The rheology of fresh cement and concrete*, Ed. Spon, 125-136, (1991).
27. H.A. Bombled, a rheological study of stiff pastes: application to cement setting, *Revue des Materiaux de Construction*, 673, 256-277, (1970).

28. H.A. Barnes, J.O. Carnali, The vane-in-cup as a novel geometry for shear-thinning and thixotropic materials, *Journal of Rheology*, 34, 841-866, (1991).
29. T. Gregory, The measurement of early strength development in polymer modified cement pastes, *Proc. 5<sup>th</sup> International congress on polymers in concrete*, 205-208, (1987).
30. S.J. O'Keefe, Rheological properties of polymer modified cements pastes, PhD thesis, Bristol Polytechnic, UK, (1991).
31. M.A. Schultz, L.J. Struble, The use of oscillatory shear to study flow behavior of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, 23, 273-282, (1993).
32. G.H. Tattersal, P.G. Banfill, The rheology of fresh concrete, Ed. Pitman, London, (1983).
33. J.I. Bhatti, P.G. Banfill, A viscometric method of monitoring the effect of retarding admixtures on the setting of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 14, 64-72, (1984).
34. P.G. Banfill, e D.C. Saunders, On viscometric examination of cement pasts, *Cement and Concrete Research*, 11, 363-370, (1981).
35. K. Hattori e K. Izumi, A new viscosity equation for non-Newtonian suspensions and its applications, *Rheology of Fresh Cement and Concrete*, Ed. Spon, London, (1991).
36. P.G. Banfill, Feasibility study of a coaxial cylinders viscometer for mortar, *Cement and Concrete Research*, 17, 329-339, (1987).
37. P.G. Banfill, Structural Breakdown and rheology of cement mortar, *Proc. of 11<sup>th</sup> International Congress on Rheology*, 790-792, (1992).
38. D.A. Williams, A.W. Saak, H.M. Jennings, The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, 29, 1491-1496, (1999).
39. P.G. Banfill, Applications of rheology in mortar production, *Proc. of the British Masonry Society*, 7-12, (1995).
40. P.G. Banfill, Use of the Viscocorder to study the rheology of fresh mortar, *Magazine of Concrete Research*, 42, 213-221, (1990).
41. P.G. Banfill, The rheology of fresh mortar, *Magazine of Concrete Research*, 43, 13-21, (1991).

42. J. Golaszewski, J. Szwabowski, Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 24, 235-248, (2004).
43. A. Papo, L. Piani, Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 34, 2097-2101, (2004).
44. P.G. Banfill, Influence of fine materials in sand on the rheology of fresh mortar, *Proc. 5<sup>th</sup> International Masonry Conference*, 119-124, (1998).
45. M. Saric-Coric, K.H. Khayat, A. Tagnit-Hamou, Performance characteristics of cement grouts made with various combinations of high-range reducer and cellulose-based viscosity modifier, *Cement and Concrete Research*, 33, 1999-2008, (2003).
46. Q. Yang, P. Zhu, X. Wu, S. Huang, Properties of concrete with a new type of saponin air-entraining agent, *Cement and Concrete Research*, 30, 1313-1317, (2000).
47. K.M. Green, M.A. Carter, W.D. Hoff, M.A. Wilson, The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 29, 1743-1747, (1999).
48. L. Struble, G.K. Sun, Viscosity of Portland cement paste as a function of concentration, *Advances on Cement Based Materials*, 2, 62-69, (1995).
49. T. Sebok, O. Stráenel, Relationships between the properties of ligninsulphonates and parameters of modified samples with cement binders – part II, *Cement and Concrete Research*, 29, 591-594, (1999).
50. C.F. Ferraris, K.H. Obla, R. Hill, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 245-255, (2001).
51. S. Chandra, J. Björnström, Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars- part I, *Cement and Concrete Research*, 32, 1605-1611, (2002).
52. I. Aiad, Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 33, 1229-1234, (2003).



53. I. Aiad, S.A. El-Aleem, H. El-Didamony, Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 33, 1839-1843, (2002).
54. H. Uchikawa, D. Sawaki, S. Hanehara, Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, 25(2), 353-364, (1995).
55. M. Cyr, C. Legrand, M. Mouret, Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, *Cement and Concrete Research*, 30, 1477-1483, (2000).

